



Física

Olga Lucía Romero Medina
Mauricio Bautista Ballén

2

HIPERTEXTO FÍSICA 2 Para educación media, es una obra colectiva, concebida, diseñada y creada por el Departamento Editorial de Santillana S.A.

Directora de Educativas Ana Julia Mora Torres

Directora Editorial Fabiola Nancy Ramírez Sarmiento

Equipo editorial
Isabel Hernández Ayala. *Coordinadora de contenidos*
Diana Constanza Salgado Ramírez. *Editora ejecutiva del área de matemáticas*
Jeinsson Giovanni Gamboa Sulvara. *Editor júnior*
Carlos David Sánchez. *Editor júnior*
Juan Gabriel Aldana Álvarez. *Asistente editorial del área de matemáticas*

Autores
Mauricio Bautista Ballén
Licenciado en matemáticas. Universidad Pedagógica Nacional.
Físico. Universidad Nacional de Colombia.
Especialista en educación matemática. Universidad Pedagógica Nacional.
Estudios de Maestría en docencia de la matemática. Universidad Pedagógica Nacional.
Experiencia
Profesor del departamento de matemáticas. Universidad Pedagógica Nacional.
Profesor de matemáticas y física. Instituto Pedagógico Nacional.

Olga Lucía Romero Medina
Licenciatura en física. Universidad Pedagógica Nacional.
Especialista en Edumática con énfasis en multimedia. Universidad Autónoma de Colombia.
Experiencia
Docente de matemáticas y física. I.E.D. Magdalena Ortega de Nariño.
Docente de matemáticas y física. I.E.D. José Félix Restrepo.

La persona encargada de avalar este texto desde el punto de vista de la disciplina específica y desde su pedagogía fue *Beatriz Bechara Cabrera.* Física. Universidad Nacional de Colombia. Science Instructor. Universidad de Londres.

La especialista encargada de avalar este texto desde la equidad de género y de su adecuación a la diversidad cultural fue *Doris Gilma Rincón Perilla.* Psicóloga. Corporación Universitaria Iberoamericana.

Las pruebas de campo del texto fueron realizadas por el Departamento de Investigación de Editorial Santillana, bajo la dirección de *Ximena Galvis Ortiz.*

Se han hecho todos los esfuerzos para ubicar a los propietarios de los derechos de autor. Sin embargo, si es necesario hacer alguna rectificación, la editorial está dispuesta a hacer los arreglos necesarios.

Equipo gráfico y técnico
Iván Merchán Rodríguez. *Coordinador creativo/Diseñador del modelo gráfico y carátulas*
Mauricio García Duque. *Coordinador contenidos digitales*
Martha Jeanet Pulido Delgado, Orlando Bermúdez Rodríguez. *Correctores de estilo*
Alveiro Javier Bueno Aguirre. *Coordinador de soporte técnico*
Luis Nelson Colmenares Barragán. *Documentalista gráfico y operador de escáner*
Claudia Marcela Jaime Tapia, Anacelia Blanco Suárez, Lady Midlennis Sánchez Yopazá. *Documentalistas*
Sandra Patricia Acosta Tovar, Hugo Armando Castrillón Toro, César Alfonso Murillo Díaz. *Diagramadores*
Diomedes Guilombo Ramírez, Carlos Alberto Salas García, Carlos Alberto Moreno Díaz, Pablo Leonardo Villafrade, Jhon Jairo Barinas, Francisco Sánchez, Danilo Ramírez Parra. *Ilustradores*
Tom Brakefield, Jymlii Manzo, Hernán Vallejo, Jairo Sanabria, María Alejandra Caicedo, Carlos Díez Polanco, Mauricio Giraldo. *Fotógrafos*
Getty images, Repositorio Santillana, Corel Professional Photos, Images provided by Photodisc, Inc., Corbis Images, Archivo Santillana, Furita S.L., Novosti, Agencia García Pelayo, S.L., Thinkstock. *Fotografía*
Francisco Rey González. *Director de producción*

Calle 80 No. 9-69
Bogotá, Colombia.

ISBN 978-958-24-1598-3 Obra completa
ISBN 978-958-24-1601-0 Edición para el estudiante
ISBN 978-958-24-1602-7 Edición para el docente

Este libro está elaborado de acuerdo con las normas ICONTEC NTC-4724 y NTC-4725 para textos escolares.

Depósito legal en trámite.

Impreso en Colombia por



HIPERTEXTO FÍSICA 2

De la serie HIPERTEXTOS SANTILLANA, es una nueva propuesta pedagógica que responde a los lineamientos curriculares y a los estándares básicos de competencias exigidos por el MEN. Tu *Hipertexto* te permitirá potenciar tus capacidades de manera que puedas manejar los conocimientos propios de esta área, aproximarte al conocimiento como científico natural y desarrollar compromisos personales y sociales.

¡Tu Hipertexto hace tu aprendizaje más dinámico!

¿Qué hay en tu hipertexto?

- Estos hipervínculos.
  Cuando los veas debes saber que cada uno de ellos te indica que, además de lo que hay en la página, vas a encontrar:



Mayor información para ampliar tus conocimientos sobre temas específicos. Además, en algunos casos, te sugiere realizar más actividades para reforzar los conceptos trabajados.

Una dirección de Internet para profundizar en un tema.



Una evaluación que te permitirá verificar tus capacidades y el aprendizaje de los contenidos de cada unidad.

Una presentación o un video que te ayudará a comprender mejor los temas desarrollados.



Este enlace te invita a consultar en nuestra página web la sección de laboratorios. Allí obtendrás el formato para la presentación de tu informe de laboratorio.



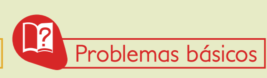
- Para acceder a esta información debes consultar la página: www.santillana.com.co/hipertextos

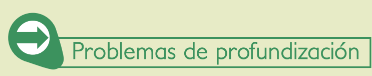
Un método para que desarrolles destrezas en la comprensión de los contenidos propios de la Física.

Comprender para aprender









- Unas HIPERPÁGINAS que, a través de infografías e imágenes llamativas, te permitirán establecer relaciones entre procesos o descomponer un todo en sus partes para conocerlas en detalle.



¿Cómo está organizado tu hipertexto?

Tu *Hipertexto* Física 2 está compuesto por ocho unidades y los contenidos están organizados de acuerdo con los componentes de Física.

Páginas iniciales

Al comienzo de cada unidad encontrarás una doble página de apertura con los temas que vas a trabajar, una lectura relacionada con los contenidos y algunas preguntas sobre ella.

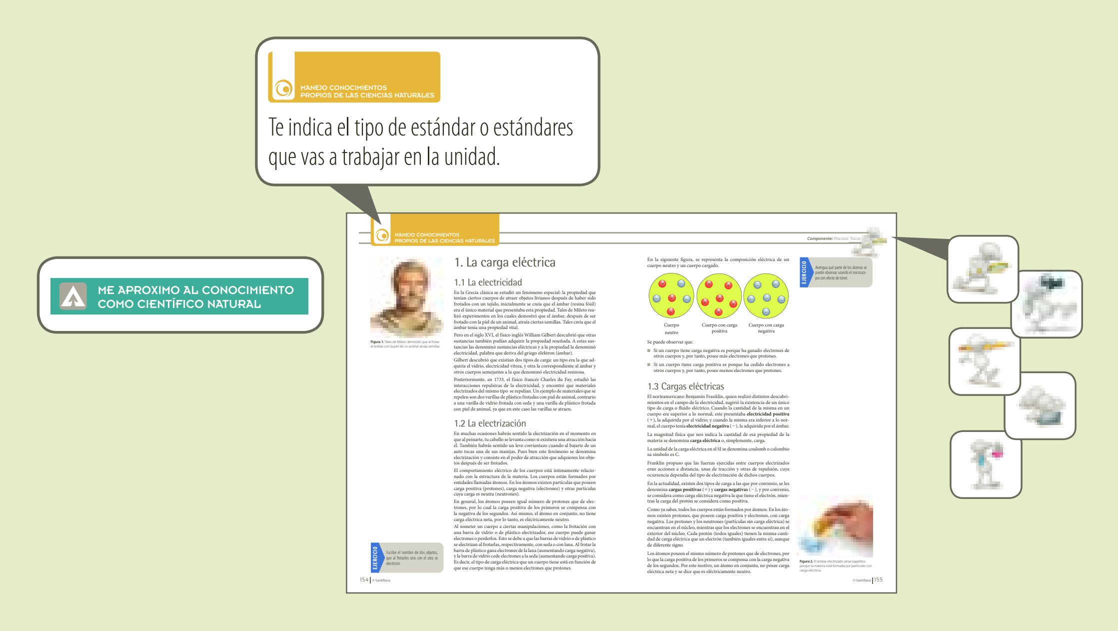


Para pensar…
Texto breve de divulgación científica que se relaciona con el tema de la unidad y recoge algunos de los aspectos más importantes que vas a estudiar.

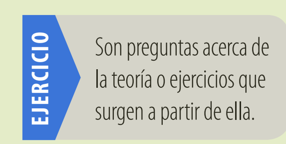
Para responder...
Las preguntas de esta sección te permitirán fortalecer tu capacidad de interpretar textos relacionados con Física.

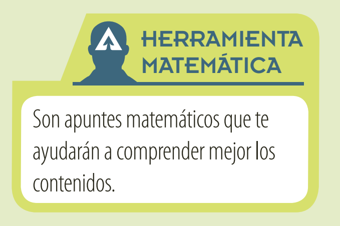
Páginas de contenido

En las páginas de contenido encontrarás las ideas fundamentales del tema con ejemplos resueltos, que explican el procedimiento que se debe realizar paso a paso.



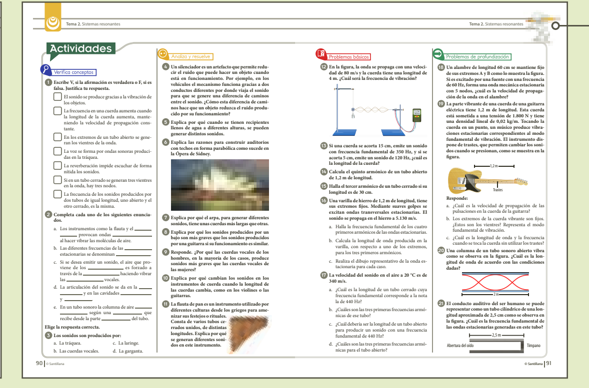
En las páginas de contenido también vas a encontrar estas señales:





Además tu hipertexto contiene:

Actividades con ejercicios enfocados a desarrollar competencias.

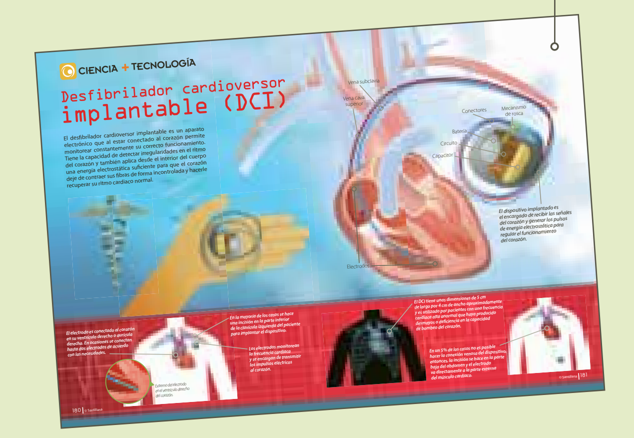


Aquí afianzarás tus conocimientos a partir de la realización de actividades, utilizando el método "Comprender para aprender".

Secciones especiales

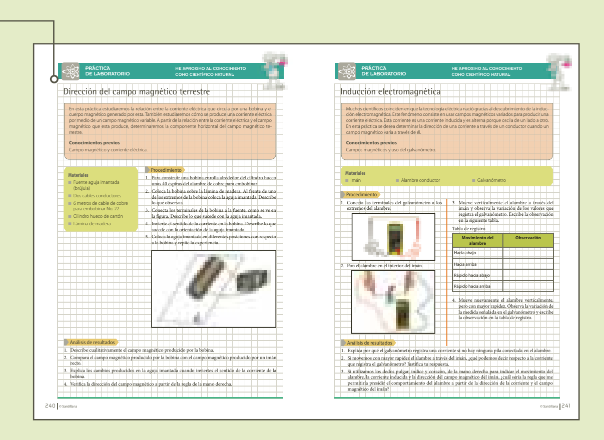
En tu Hipertexto Física 2, también encontrarás algunas secciones especiales que puedes identificar así:

Ciencia + tecnología: esta sección te informa sobre algunos elementos, procesos y avances tecnológicos, su funcionamiento y la manera como estos influyen en la sociedad.





Prácticas de laboratorio: a través de estas prácticas podrás comprobar algunos fenómenos científicos y aplicar conceptos tratados en cada unidad, para aproximarte al conocimiento como científico natural.



CONTENIDO



UNIDAD

1

Oscilaciones

Temas de la unidad

1. Movimiento Armónico Simple (MAS)
2. La energía en los sistemas oscilantes



Para pensar…

Es común encontrar sobre un escritorio objetos que describen movimientos repetitivos. Por ejemplo, los péndulos en forma de figuras.

Este es uno de los muchos ejemplos que nos muestran que el mundo está lleno de objetos que oscilan o vibran, como un objeto en el extremo de un resorte, las cuerdas de un violín o de un piano, o los pistones de un motor, entre otros.

En realidad, la mayor parte de los objetos materiales vibran, al menos brevemente, cuando se les da un impulso. De esta manera, se presentan oscilaciones eléctricas en los aparatos de radio y televisión, vibraciones en puentes al pasar un vehículo pesado, modificaciones en un colchón elástico cuando un acróbata salta sobre él, y, a nivel atómico, vibración de los átomos dentro de una molécula, etc.

En este capítulo se analizan los movimientos oscilatorios y la transformación de la energía que experimenta un cuerpo que realiza este tipo de movimiento.

Para responder…

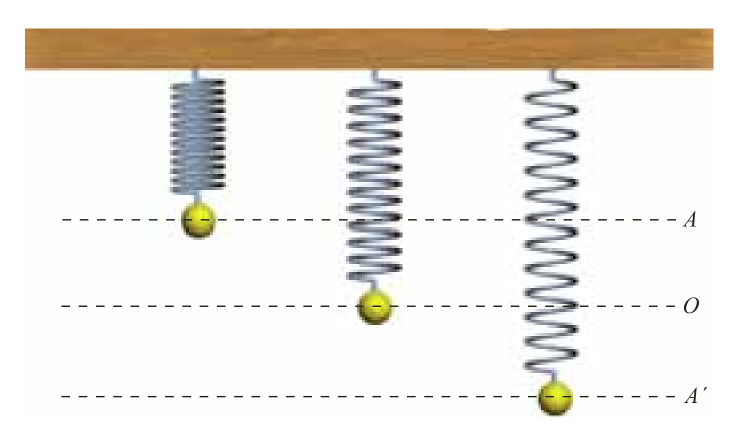
- ¿Qué significa la palabra oscilación?
- ¿Qué otros objetos describen un movimiento oscilatorio?

1. Movimiento Armónico Simple

1.1 Movimiento oscilatorio

En la naturaleza existen algunos cuerpos que describen movimientos repetitivos con características similares, como el péndulo de un reloj, las cuerdas de una guitarra o el extremo de una regla sujeta en la orilla de una mesa. Todos los movimientos que describen estos objetos se definen como **periódicos**.

La forma más simple de movimiento periódico es el movimiento oscilatorio de un objeto que cuelga atado de un resorte. Este objeto oscila entre sus posiciones extremas, pasando por un punto que corresponde a su posición de equilibrio, como se observa en la figura.



Definición

Un movimiento oscilatorio se produce cuando al trasladar un sistema de su posición de equilibrio, una fuerza restauradora lo obliga a desplazarse a puntos simétricos con respecto a esta posición.

Para describir un movimiento oscilatorio es necesario tener en cuenta los siguientes elementos: la oscilación, el período, la frecuencia, la elongación y la amplitud.

- La **oscilación**: una oscilación o ciclo se produce cuando un objeto, a partir de determinada posición, después de ocupar todas las posibles posiciones de la trayectoria, regresa a ella. Por ejemplo, en la figura anterior se produce un ciclo cuando el objeto describe una trayectoria *AOA'OA*.
- El **período**: es el tiempo que tarda un objeto en realizar una oscilación. Su unidad en el Sistema Internacional (SI) es el segundo y se representa con la letra T.
- La **frecuencia**: es el número de ciclos que realiza un objeto por segundo. La frecuencia, representada por f, se expresa en el SI en hercios (Hz).

En el movimiento oscilatorio, al igual que en el movimiento circular uniforme, la frecuencia y el período se relacionan entre sí, siendo uno recíproco del otro, es decir:

$$f = \frac{1}{T} \text{ y } T = \frac{1}{f}$$

- La **elongación**: es la posición que ocupa un objeto respecto de su posición de equilibrio. En la figura 1 se representan diferentes elongaciones: x_1, x_2 y x_3.
- La **amplitud**: la amplitud del movimiento, denotada con A, es la mayor distancia (máxima elongación) que un objeto alcanza respecto de su posición de equilibrio. La unidad de A en el SI es el metro.

  En el ejemplo de la figura 1 la amplitud es $A = 10$ m.

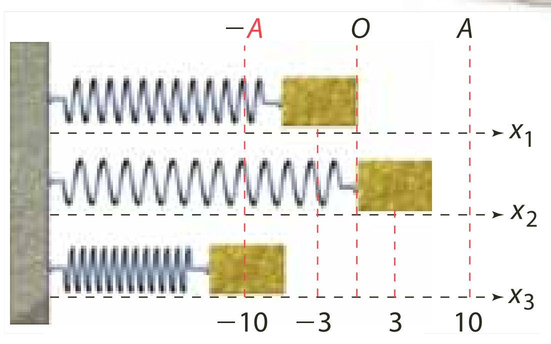


Figura 1. Posiciones que ocupa la masa en el tiempo y amplitud del movimiento.

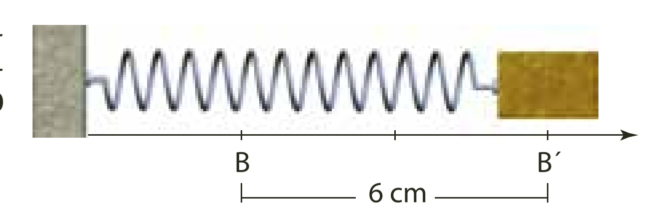


1. Un bloque atado a un resorte oscila (sin fricción) entre las posiciones extremas *B* y *B'* indicadas en la figura. Si en 10 segundos pasa 20 veces por el punto *B*, determinar:

a. El período de oscilación.

b. La frecuencia de oscilación.

c. La amplitud.



Solución:

a. Cada vez que el bloque pasa por B, completa un ciclo, por tanto, en 10 segundos realiza 20 ciclos, es decir que un ciclo ocurre en un tiempo:

$$T = \frac{10\,s}{20} = \frac{1}{2}\,s$$ *El período del movimiento es:* 1/2 s

b. La frecuencia es: $f = \frac{1}{T}$ *Ecuación de la frecuencia*

Al remplazar y calcular $f = \frac{1}{1/2s} = 2\,\text{s}^{-1} = 2\,Hz$ *La frecuencia de oscilación es* 2 Hz

c. El punto de equilibrio del sistema se ubica en el punto medio entre B y B'. Por lo tanto, la amplitud del movimiento es $A = 3$ cm.

2. Una esfera se suelta en el punto *A* y sigue la trayectoria que se muestra en la figura. Resolver los siguientes literales:

a. Considerar que hay fricción y describir la trayectoria del movimiento.

b. Describir la trayectoria del movimiento suponiendo que no hay fricción.

A *C* *B*

Solución:

a. Si hay fricción, la energía mecánica no se conserva y la esfera no alcanza el punto C, que está a la misma altura que A con respecto a B. Cuando oscila alrededor de B, cada vez alcanza menos altura, hasta lograr el reposo.

b. Si no hay fricción, la esfera alcanza el punto C, pasa por B y alcanza el punto A, oscilando indefinidamente con respecto al punto B.

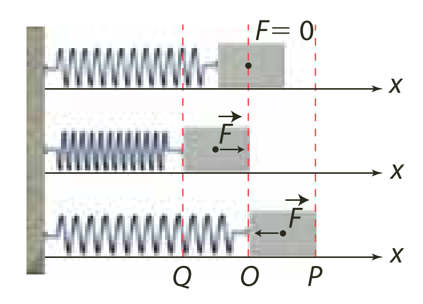


Figura 2. Al retirar la fuerza aplicada sobre la pelota recupera su forma inicial.

1.2 Movimiento Armónico Simple (MAS)

Al comprimir una pelota antiestrés, su forma inicial se recupera a partir del instante en que se deja de ejercer fuerza sobre ella (figura 2). Todos los materiales, unos más que otros, presentan este comportamiento debido a que el movimiento de sus partículas depende de las fuerzas intermoleculares. Cada partícula del objeto oscila alrededor de su punto de equilibrio, alcanzando su posición extrema, que es cuando inicia el proceso de recuperación de su estado inicial; es como si cada partícula permaneciera atada a su vecina mediante un resorte y oscilara como cuando se comprime.

Observar la siguiente figura:



Para que un objeto, como el representado en la figura, describa un movimiento oscilatorio, se requiere que sobre él actúe una fuerza que lo dirija del punto O hacia el punto Q, lo cual ocasiona una disminución en su rapidez e implica que dicha fuerza esté dirigida hacia O. Si el objeto se mueve del punto Q al punto O, la rapidez se incrementa, dirigiendo la fuerza hacia el punto O.

Cuando el objeto se mueve del punto O hacia el punto P, la rapidez disminuye, lo cual implica que la fuerza esté dirigida hacia el punto O, y cuando el objeto se mueve desde el punto P hacia el punto O, la rapidez aumenta, lo cual requiere que la fuerza esté dirigida hacia el punto O.

En todos los casos, la fuerza está dirigida hacia la posición de equilibrio (O), por lo cual se denomina fuerza de restitución. A este tipo especial de movimiento se le llama movimiento armónico simple.

Definición

Un movimiento armónico simple es un movimiento oscilatorio en el cual se desprecia la fricción y la fuerza de restitución es proporcional a la elongación. Al cuerpo que describe este movimiento se le conoce como oscilador armónico.

Como los vectores fuerza y elongación se orientan en direcciones contrarias, podemos relacionar fuerza y elongación mediante la ley de Hooke:

$$F = -kx$$

Siendo k la constante elástica del resorte, expresada en N/m según el SI.

La constante elástica del resorte se refiere a la dureza del mismo. A mayor dureza mayor constante y, por lo tanto, mayor fuerza se debe hacer sobre el resorte para estirarlo o comprimirlo. Como acción a esta fuerza, la magnitud de la fuerza recuperadora mantiene la misma reacción.



Robert Hooke. Formuló en 1660 la *Ley de Hooke*, que describe cómo la fuerza que actúa sobre un cuerpo elástico es proporcional a la longitud que se estira.

EJEMPLO

Un ascensor de carga tiene una masa de 150 kg. Cuando transporta el máximo de carga, 350 kg, comprime cuatro resortes 3 cm. Considerando que los resortes actúan como uno solo, calcular:

a. La constante del resorte.

b. La longitud de la compresión del resorte cuando el ascensor no tiene carga.

Solución:

a. La fuerza (el peso) ejercida por el ascensor y la carga:

$F = W = (m_{asc} + m_{car})\,g$ *Fuerza ejercida*

$W = (150\text{ kg} + 350\text{ kg})\,(9{,}8\text{ m/s}^2)$ *Al remplazar*

$W = 4.900\text{ N}$ *Al calcular*

La fuerza ejercida por el ascensor y la carga es 4.900 N y comprimen el resorte $3{,}0 \times 10^{-2}$ m. Por lo tanto, de acuerdo con la ley de Hooke, la constante del resorte es:

$k = \dfrac{F}{x}$ *Al despejar k*

$k = \dfrac{4.900\ N}{3{,}0 \times 10^{-2}\ m}$ *Al remplazar*

Por lo tanto,

$k = 163.333{,}3$ N/m

La constante del resorte es 163.333,3 N/m

b. La fuerza ejercida sobre el resorte para el ascensor sin carga es su peso:

$W = (150\text{ kg})\,(9{,}8\text{ m/s}^2) = 1.470$ N, por lo tanto:

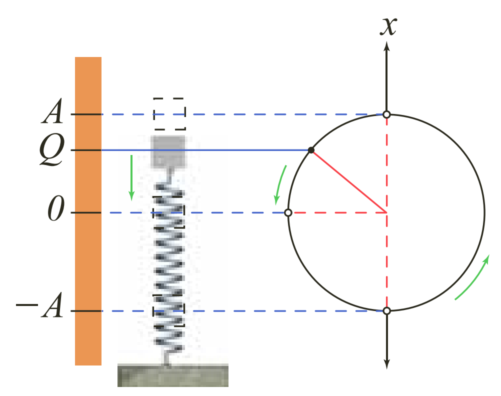
$x = \dfrac{1.470\ N}{163.333{,}3\ N/m}$ *Al remplazar*

$x = 9 \times 10^{-3}$ m *Al calcular*

Cuando el ascensor no tiene carga, el resorte se comprime 9 mm.

1.3 Proyección de un movimiento circular uniforme

Para encontrar las ecuaciones de la posición, la velocidad y la aceleración de un movimiento armónico simple, nos apoyaremos en la semejanza entre la proyección del movimiento circular uniforme de una pelota pegada al borde de un disco y una masa que vibra sujeta al extremo de un resorte, como lo muestra la figura.



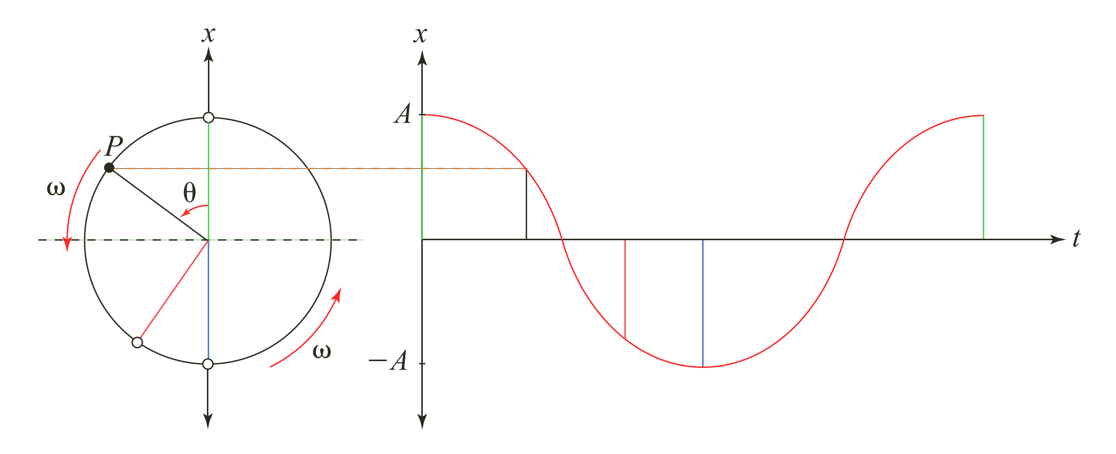
El movimiento oscilatorio de la masa y la proyección circular uniforme de la pelota son idénticos si:

- La amplitud de la oscilación de la masa es igual al radio del disco.
- La frecuencia angular del cuerpo oscilante es igual a la velocidad angular del disco.

El círculo en el que la pelota se mueve, de modo que su proyección coincide con el movimiento oscilante de la masa, se denomina círculo de referencia.

La posición

Para encontrar la ecuación de posición de una masa con movimiento armónico simple en función del tiempo, se emplea el círculo de referencia y un punto de referencia *P* sobre él. En la siguiente figura se observa que en un instante de tiempo *t*, una pelota se ha desplazado angularmente, forma un ángulo θ sobre el eje *x*. Al girar el punto *P* en el punto de referencia con velocidad angular ω, el vector *OP* también gira con la misma velocidad angular, proyectando su variación de posición con respecto al tiempo.



Esta proyección de la posición de la pelota sobre el eje *x* se puede determinar mediante la expresión:

$$x = A \cdot \cos \theta$$

Como la pelota gira con velocidad angular ω, el desplazamiento se expresa como $\theta = \omega \cdot t$. Por lo tanto, la elongación, *x*, en el movimiento oscilatorio es:

$$x = A \cdot \cos (\omega \cdot t)$$

EJEMPLO

Un cuerpo describe un movimiento circular uniforme con período de 0,1 s y radio 5 cm. Determinar:

a. La velocidad angular del movimiento circular.

b. La ecuación de posición del objeto a los 0,25 segundos después de que el objeto ha pasado por el punto *P*.

Solución:

a. La velocidad angular del movimiento es:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$ *Al remplazar y calcular*

$$\omega = \frac{2\pi}{0{,}1\ s} = 20\pi\ rad/s$$

La velocidad angular es 20π rad/s

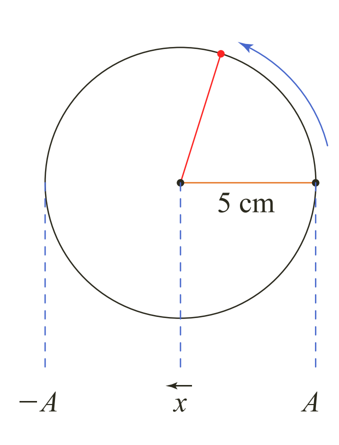
b. La posición del objeto después de 0,25 segundos es:

$x = A \cdot \cos (\omega \cdot t)$

$x = = 5\ \text{cm} \cdot \cos (20\pi\ \text{rad/s} \cdot 0{,}25\ \text{s})$ *Al remplazar*

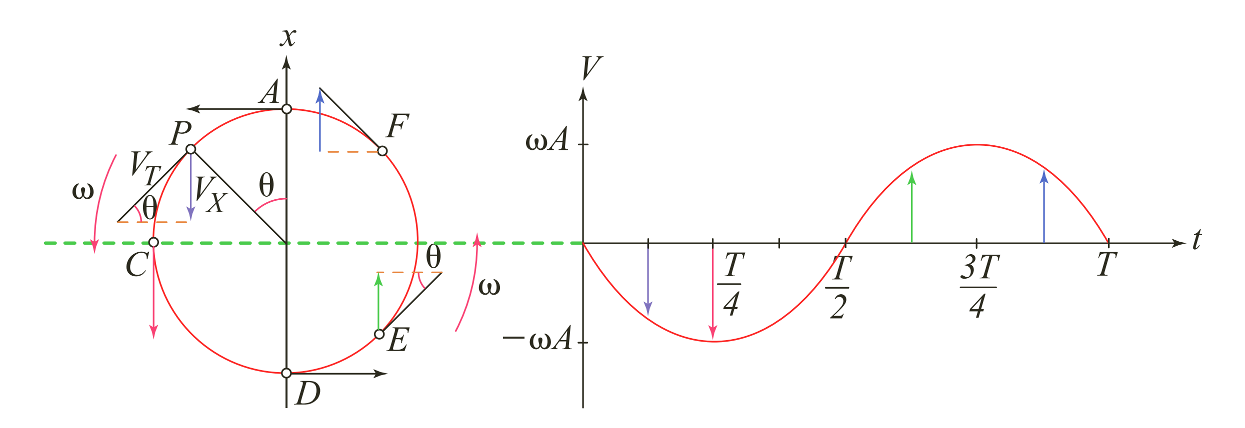
$x = -5\ \text{cm}$ *Al calcular*

El cuerpo se encuentra a −5 cm de la posición de equilibrio.



1.3.1 La velocidad

La ecuación de velocidad de una masa con movimiento armónico simple en función del tiempo la hallaremos mediante el círculo de referencia y un punto de referencia *P* sobre él. La velocidad lineal (v_T), que describe la pelota, es tangente a la trayectoria circular del movimiento. Por lo tanto, la velocidad de la proyección del objeto sobre el eje *x* (v_x) es la componente paralela a este, tal como se observa en la figura.



En la figura anterior se observa que:

- En $t = 0$ (posición *A*) y en $t = \frac{T}{2}$ (posición *D*), la velocidad es cero, pues no hay componente de la velocidad en el eje *x*.
- La magnitud de la velocidad es máxima en el punto de equilibrio e igual a la velocidad lineal del movimiento circular uniforme.
- Cuando la pelota barre un ángulo de 0 a π radianes, la dirección de la velocidad es negativa.
- Cuando la pelota barre un ángulo de π a 2π radianes, la dirección de la velocidad es positiva.

La proyección de la velocidad de la pelota sobre el eje *x* se expresa como:

$$v_x = -v \cdot \text{sen}\,(\omega \cdot t)$$

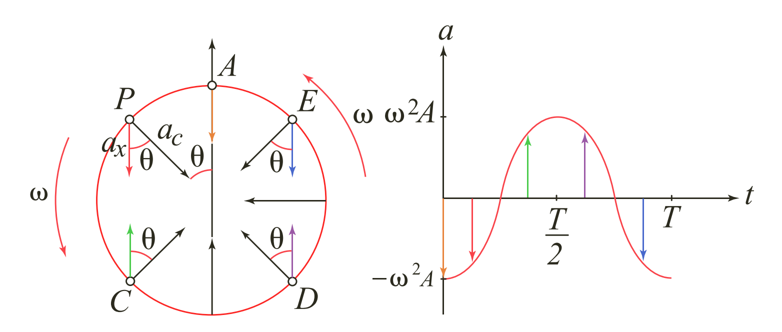
Puesto que la velocidad tangencial y la velocidad angular se relacionan mediante la ecuación $v = \omega \cdot A$, la velocidad del objeto proyectada sobre el eje *x* se expresa como:

$$v_x = -\omega \cdot A \cdot \text{sen}\,(\omega \cdot t)$$

1.3.2 La aceleración

La ecuación de la aceleración de una masa con movimiento armónico simple en función del tiempo se halla mediante el círculo de referencia y un punto *P* sobre él.

Cuando la pelota describe un movimiento circular uniforme, la aceleración que experimenta es centrípeta (a_c). Por lo cual, la aceleración de la proyección de este movimiento (*a*) sobre el eje *x* es la componente paralela a este, tal como se muestra en la figura de la página siguiente.



La aceleración de la proyección del movimiento circular uniforme se expresa como:

$$a = -a_c \cdot \cos(\omega \cdot t)$$

En un movimiento circular uniforme la aceleración es centrípeta, es decir,

$a_c = \omega^2 \cdot A$, luego, la expresión para la aceleración sobre el eje x es:

$$a = -\omega^2 \cdot A \cdot \cos(\omega \cdot t)$$

Al comparar esta ecuación con la ecuación de la posición, $x = A \cdot \cos\theta$, también se puede expresar la aceleración como:

$$a = -\omega^2 \cdot x$$

De acuerdo con la segunda ley de Newton, $F = m \cdot a$, se puede expresar la fuerza de este movimiento oscilatorio como:

$F = m \cdot a$ — *Segunda Ley de Newton*

$F = m \cdot (-\omega^2 \cdot x)$ — *Al remplazar* $a = -\omega^2 \cdot x$

$F = -m \cdot \omega^2 \cdot x$

Como la masa y la velocidad angular son constantes, entonces la fuerza de la proyección del movimiento circular uniforme varía en forma proporcional a la elongación. En consecuencia, el movimiento de la proyección de un movimiento circular uniforme es armónico simple.

EJEMPLO

Para el día de la ciencia, los estudiantes del grado once construyeron un pistón que realiza un movimiento armónico simple. La amplitud del movimiento es de 0,8 cm y su frecuencia angular de 188,5 rad/s. Si se considera el movimiento a partir de su elongación máxima positiva después de tres segundos, calcular:

a. La velocidad del pistón.
b. La aceleración del pistón.

Solución:

a. La magnitud de la velocidad al cabo de 3 s es:

$v_x = -\omega \cdot A \cdot \text{sen}(\omega \cdot t)$

$v = -188{,}5 \text{ Hz} \cdot 0{,}8 \text{ cm} \cdot \text{sen}(188{,}5 \text{ Hz} \cdot 3 \text{ s})$

$v = -65 \text{ cm/s}$

Al cabo de 3 segundos, la velocidad del pistón es de -65 cm/s.

El signo negativo significa que la dirección es contraria a la dirección de la elongación.

b. La magnitud de la aceleración al cabo de 3 s es:

$a = -\omega^2 \cdot A \cdot \cos(\omega \cdot t)$

$a = -(188{,}5 \text{ Hz})^2 \cdot 0{,}8 \text{ cm} \cdot \cos(188{,}5 \text{ Hz} \cdot 3 \text{ s})$

$a = -25.656{,}7 \text{ cm/s}^2$

A los 3 segundos, el pistón alcanza una aceleración de $-256{,}56$ m/s^2.

El signo negativo es por la dirección contraria a la dirección positiva de la elongación.



1.4 Ecuaciones generales del movimiento armónico simple

Para hallar las ecuaciones del movimiento armónico simple se considera como posición inicial del cuerpo el punto P sobre la parte positiva del eje x en su máxima elongación (figura 3).

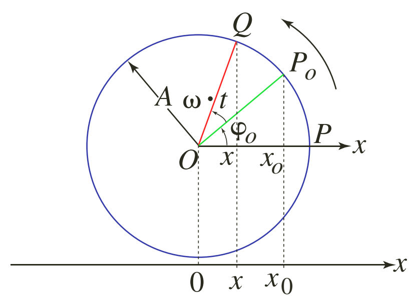


Figura 3. El punto P indica la posición inicial del cuerpo en el movimiento armónico simple.

Sin embargo, no necesariamente la posición inicial debe ser en dicho punto; por ejemplo, si la posición inicial es el punto P_0, ubicado sobre la recta OP_0 que forma un ángulo φ_0 con la recta OP, la ecuación para la posición del movimiento armónico simple es:

$$x = A \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_0)$$

El ángulo $\omega \cdot t + \varphi_0$ se conoce como fase de oscilación y el ángulo φ_0 como constante de fase. Si x_0 es la posición inicial del movimiento armónico simple, x_0 y φ_0 se relacionan mediante la expresión:

$$x_0 = A \cdot \cos \varphi_0$$

La ecuación de la velocidad para el movimiento armónico simple, cuando el movimiento comienza en un punto diferente a la elongación máxima positiva, es:

$$v = -\omega \cdot A \cdot \text{sen}(\omega \cdot t + \varphi_0)$$

Así mismo la aceleración se expresa como:

$$a = -\omega^2 \cdot A \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_0)$$

En la siguiente tabla se resumen las ecuaciones del movimiento armónico simple, tomando como posición inicial la elongación máxima positiva del cuerpo u otro punto diferente.

	Si en $t = 0$, $x_0 = A$	**Si en $t = 0$, $x_0 = A \cdot \cos \varphi_0$**
Posición	$x = A \cdot \cos(\omega \cdot t)$	$x = A \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_0)$
Velocidad	$v = -\omega \cdot A \cdot \text{sen}(\omega \cdot t)$	$v = -\omega \cdot A \cdot \text{sen}(\omega \cdot t + \varphi_0)$
Aceleración	$a = -\omega^2 \cdot A \cdot \cos(\omega \cdot t)$	$a = -\omega^2 \cdot A \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_0)$

En las ecuaciones de movimiento armónico simple se cumple que:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

Puesto que el máximo valor que toma la función seno es igual a 1, a partir de las ecuaciones podemos ver que el valor de la velocidad máxima del objeto es:

$$v_{máx} = \omega \cdot A$$

También el valor de la aceleración máxima:

$$a_{máx} = \omega^2 \cdot A$$



EJEMPLOS

1. Un objeto atado al extremo de un resorte oscila con una amplitud de 5 cm y período igual a 1 s. Si el movimiento se observa desde que el resorte está en su máxima elongación positiva, calcular:

a. La máxima velocidad del movimiento.

b. La máxima aceleración alcanzada por el objeto.

Solución:

a. Como la ecuación de la velocidad del movimiento armónico simple es:

$v = -\omega \cdot A \cdot \text{sen}\,(\omega \cdot t)$

La velocidad es máxima, $v_{máx}$, si sen $(\omega \cdot t) = \pm 1$, por lo tanto: $v_{máxima} = \omega \cdot A$

Como $\omega = \dfrac{2\pi}{T} = 2\pi$ rad/s, tenemos que: $v_{máx} = (2\pi \text{ rad/s})(5 \text{ cm}) = 31{,}4$ cm/s

La magnitud de la velocidad máxima es 31,4 cm/s.

b. Como la ecuación de la aceleración del movimiento armónico simple es:

$a = -\omega^2 \cdot A \cdot \cos\,(\omega \cdot t)$

La aceleración es máxima, $a_{máx}$, si cos $(\omega \cdot t) = \pm 1$ y mínima cuando es cero, por lo tanto:

$a_{máxima} = \omega^2 \cdot A$

$a_{máxima} = (2\pi \text{ rad/s})^2 \cdot 5$ cm *Al remplazar*

$a_{máxima} = 197{,}4$ cm/s^2 *Al calcular*

El cuerpo alcanza una aceleración máxima de 1,97 m/s^2 y mínima de 0 cm/s^2.

2. Un cuerpo describe un movimiento circular uniforme (MCU) con una velocidad angular de 20π rad/s y radio 5 cm. Si el objeto se encuentra en un punto P_0 a π/3 rad de la posición de equilibrio, determinar:

a. La posición del objeto en el punto P_0.

b. La posición del objeto 0,3 segundos después de haber pasado por el punto P_0.

c. La velocidad del objeto en ese mismo instante.

Solución:

a. Para la posición inicial del objeto tenemos:

$x_0 = A \cdot \cos \varphi_0$

$x_0 = 5 \text{ cm} \cdot \cos\,(\pi/3)$ *Al remplazar*

$x_0 = 2{,}5$ cm *Al calcular*

La posición inicial del cuerpo es 2,5 cm.

b. Como la posición inicial del objeto que describe el MCU no está en su máxima elongación positiva, la posición se expresa mediante la ecuación:

$x = A \cdot \cos\,(\omega \cdot \text{t} + \varphi_0)$

$x = 5 \text{ cm} \cdot \cos\,(20\pi \text{ rad/s} \cdot 0{,}3 \text{ s} + \pi/3 \text{ rad})$

$x = 2{,}5$ cm *Al calcular*

A los 0,3 segundos el cuerpo se encuentra a 2,5 cm.

c. La velocidad del objeto 0,3 segundos después de haber pasado por el punto P_0 se expresa mediante:

$v = -\omega \cdot A \cdot \text{sen}\,(-\omega \cdot t + \varphi_0)$

Al remplazar tenemos que:

$v = [-20\,\pi/\text{s} \cdot 5 \text{ cm}][\text{sen}\,(20\,\pi \text{ rad/s} \cdot 0{,}3 \text{ s} + \pi/3 \text{ rad})]$

Luego: $v = -272{,}1$ cm/s

A los 0,3 s, alcanza una velocidad igual a −272,1 cm/s.

1.5 Período de un movimiento armónico simple

Hasta el momento se han mencionado movimientos oscilatorios en los cuales se conoce previamente el período, sin embargo, es posible encontrar una expresión para este, relacionando la fuerza recuperadora y la fuerza en el movimiento armónico simple. Así:

$$F = -k \cdot x, \qquad \text{y,} \qquad F = -m \cdot \omega^2 \cdot x$$

Al igualar las dos ecuaciones se tiene que:

$$-k \cdot x = -m \cdot \omega^2 \cdot x \qquad \textit{Al igualar las ecuaciones}$$

$$-k = -m \cdot \omega^2 \qquad \textit{Al simplificar } x$$

$$k = m \cdot \omega^2 \qquad \textit{Al multiplicar por } -1$$

Si se despeja la frecuencia angular ω, obtenemos:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Como $\omega = \frac{2\pi}{T}$, al igualar tenemos: $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{2\pi}{T}$

Al despejar T obtenemos la ecuación del período para el movimiento armónico simple:

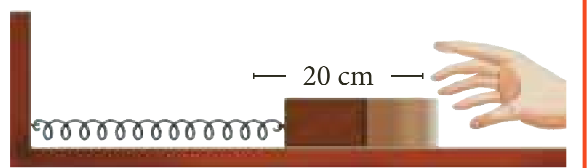
$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{m}{k}}$$

Por lo tanto, el período para un movimiento armónico simple depende de la masa del objeto oscilante y la constante elástica del resorte.

EJEMPLO

La figura muestra un objeto cuya masa es 200 g atado al extremo de un resorte cuya constante elástica es 100 N/m. El objeto se aleja de la posición de equilibrio una distancia igual a 20 cm y se suelta para que oscile. Si se considera despreciable la fricción, determinar:

a. La amplitud, el período y la frecuencia del movimiento.
b. La ecuación de la posición del movimiento.
c. La gráfica de la elongación x en función del tiempo.



Solución:

a. • Como el objeto se aleja 20 cm de la posición de equilibrio, la amplitud del movimiento es 20 cm.

• El período de un MAS está dado por:

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{m}{K}}$$

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{0{,}2\ \text{kg}}{100\ \text{N/m}}} \qquad \textit{Al remplazar}$$

$$T = 0{,}28\ \text{s} \qquad \textit{Al calcular}$$

El período de oscilación es 0,28 s.

• La frecuencia del movimiento está dada por:

$$f = \frac{1}{T}$$

$$f = \frac{1}{0{,}28\ \text{s}} = 3{,}57\ s^{-1} \qquad \textit{Al remplazar}$$

La frecuencia de oscilación es 3,57 s^{-1}.

EJEMPLO

b. La ecuación para la posición del objeto es:

$x = A \cdot \cos(\omega \cdot t)$

Como:

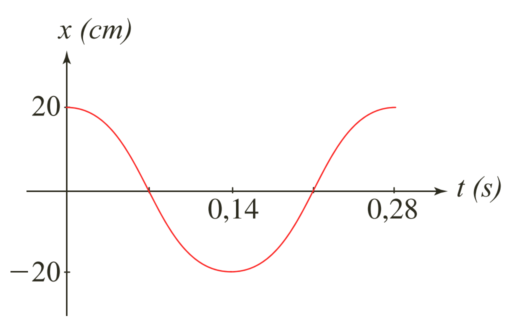
$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{0{,}28\ \text{s}}$$

$$\omega = 22{,}44\ \text{rad/s}$$

Al remplazar tenemos que la ecuación de posición es:

$x = 20 \cdot \cos 22{,}44 \cdot t$

c. La representación gráfica de la elongación en función del tiempo es:





1.6 El motor de gasolina

A partir de un movimiento oscilatorio se puede producir un movimiento circular. Un ejemplo de esta relación es el funcionamiento de un motor de gasolina de cuatro tiempos (figura 4):

- admisión
- compresión
- explosión
- escape

- En el primer tiempo, el de *admisión*, la mezcla de gasolina y aire llega a la cámara de combustión a través de la válvula de admisión, mientras el pistón baja a lo largo del cilindro.
- En el segundo tiempo, el de *compresión*, la válvula de admisión se cierra y el pistón sube, comprimiendo la mezcla.
- En el tercer tiempo, el de *explosión*, la bujía produce una chispa y se realiza trabajo sobre el pistón, ya que este baja a causa de la expansión de los gases resultantes.
- En el cuarto tiempo, el de *escape*, se abre la válvula de escape, permitiendo la salida de los gases mientras el pistón sube por el cilindro. A continuación se cierra la válvula de escape y se abre la de admisión, iniciando de esta manera otro ciclo.

El inicio de este funcionamiento, en un automóvil, se produce a través del arranque, mediante la llave. Es por esto que cuando el arranque de un automóvil, por una u otra razón no funciona, hay que ponerlo en marcha empujándolo, con el fin de que el movimiento circular de las ruedas inicie este proceso.

En un motor diesel no existe bujía, por lo cual no hay chispa en el tercer tiempo (explosión), ya que el combustible es introducido por medio de una bomba de inyección.

Un motor diesel aprovecha un mayor porcentaje del calor producido y resiste grandes compresiones, pero es más costoso y más pesado. Se utiliza en vehículos pesados, como camiones, tractomulas, buses articulados, etc.

Es importante resaltar que los gases producidos por los motores ejercen un gran impacto en el medio ambiente, siendo más nocivo el motor diesel que el de gasolina.

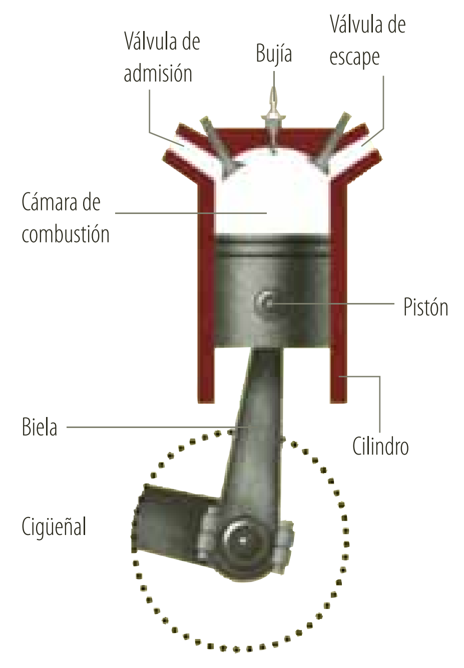


Figura 4. El movimiento oscilatorio de la biela genera un movimiento circular en el cigüeñal.

2. La energía en los sistemas oscilantes

2.1 La energía en el movimiento armónico simple

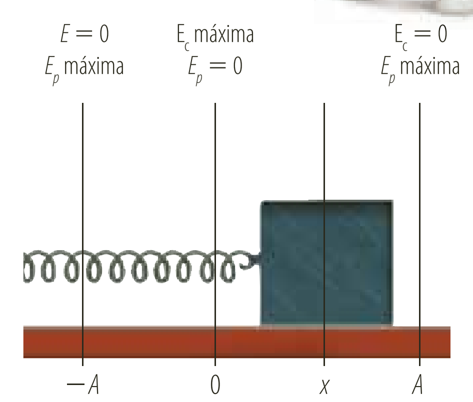


Figura 5. En el movimiento armónico simple la energía mecánica se conserva, al transformarse la energía potencial en cinética y viceversa.

Un movimiento armónico simple se produce en ausencia de fricción, pues la fuerza neta que actúa sobre el objeto —fuerza de restitución— es conservativa y la energía mecánica total se conserva.

Al estirar o comprimir un resorte se almacena energía potencial por efecto del trabajo realizado sobre él. En la figura 5 se observa que en los puntos extremos A y $-A$, la energía potencial es máxima, debido a que la deformación del resorte es máxima, y nula cuando está en su posición de equilibrio.

Por otra parte, mientras el objeto oscila, la energía cinética es cero en los puntos extremos de la trayectoria, y máxima al pasar por la posición de equilibrio.

Esto se debe a que cuando $x = 0$ la magnitud de la velocidad es máxima.

Al escribir el análisis anterior tenemos que en el resorte la energía potencial es elástica y se expresa como:

$$Ep = \frac{1}{2} \cdot k \cdot x^2$$

siendo x la longitud de la deformación. La energía cinética está dada por la expresión:

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

Como la energía mecánica se conserva, la energía de la partícula es:

$$E_m = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 + \frac{1}{2} \cdot k \cdot x^2$$

En los puntos extremos, $x = A$ o $x = -A$, la velocidad es cero, por lo tanto, la energía en dichos puntos es potencial, y se expresa como:

$$E_m = E_p + E_c$$

$$E_m = \frac{1}{2} \cdot k \cdot A^2 + 0$$

$$E_m = \frac{1}{2} \cdot k \cdot A^2$$

En el punto de equilibrio, $x = 0$, la fuerza de restitución ejercida por el resorte, y por consiguiente la energía potencial elástica, es igual a cero. Es decir, en la posición de equilibrio, la energía del sistema es cinética.

$$E_m = E_p + E_c$$

$$E_m = 0 + \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2_{máx}$$

$$E_m = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2_{máx}$$



Una expresión para la aceleración del objeto en cualquier posición se define a partir de la relación entre la fuerza que se ejerce sobre un cuerpo con movimiento armónico simple y la expresión de la fuerza determinada por la segunda ley de Newton:

$$F = -k \cdot x \qquad \text{y} \qquad F = m \cdot a$$

Al igualar las dos ecuaciones se tiene que:

$-k \cdot x = m \cdot a$ *Al igualar las expresiones*

$a = -k \cdot x/m$ *Al despejar a*

Entonces, la expresión para la aceleración de un cuerpo con movimiento armónico simple en cualquier posición es:

$$a = -k \cdot x/m$$

Según la segunda ley de Newton, la dirección de la fuerza y la dirección de la aceleración son la misma. En concordancia con la ley de Hooke, concluimos que *la fuerza de restitución del resorte es cero cuando el cuerpo se encuentra en el punto de equilibrio y máxima en los puntos extremos.*

EJEMPLO

La figura muestra la gráfica de la energía potencial en función de la amplitud de un cuerpo de 1 kg que realiza un movimiento armónico simple.

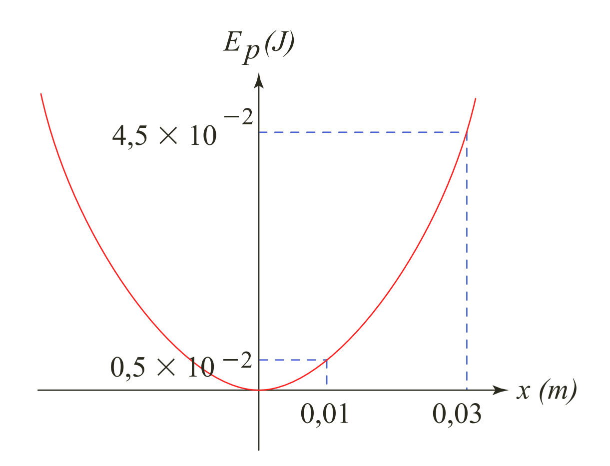
Si la amplitud del cuerpo es 0,03 m, calcular:

a. La energía mecánica del cuerpo en este movimiento armónico simple.

b. La constante de restitución del movimiento.

c. El período de oscilación.

d. La energía cinética en la posición $x = 0{,}01$ m y la velocidad que alcanza el cuerpo en este punto.



Solución:

a. Para $x = 0{,}03$ m, que es el valor de la amplitud, la gráfica muestra que el valor de la energía potencial es $E_p = 4{,}5 \times 10^{-2}$ J, entonces: $E_m = 4{,}5 \times 10^{-2}$ J

La energía mecánica es igual a $4{,}5 \times 10^{-2}$ J.

b. Para calcular la constante de restitución del movimiento se tiene que:

$$k = \frac{2E_p}{A^2} = \frac{2 \cdot 4{,}5 \times 10^{-2}\ J}{(0{,}03\ \text{m})^2}$$

La constante de restitución del movimiento es 100 N/m.

c. El período de un MAS está dado por:

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{m}{k}} = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{1\ \text{kg}}{100\ N/m}} = 0{,}63\ \text{s}$$

El período de oscilación es 0,63 s.

d. En la gráfica vemos que para $x = 0{,}01$ m la $E_p = 0{,}5 \times 10^{-2}$ J, entonces la E_c es:

$E_m = E_p + E_c$

$E_c = E_m - E_p$ Al despejar E_c

$E_c = 4{,}5 \times 10^{-2}\ \text{J} - 0{,}5 \times 10^{-2}\ \text{J} = 4{,}0 \times 10^{-2}$ J.

La energía cinética es igual a $4{,}0 \times 10^{-2}$ J

La velocidad para esta posición se expresa a partir de la ecuación de la energía cinética, así:

$$v = \sqrt{\frac{2\,E_c}{\text{m}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 4 \times 10^{-2}\ J}{1\ \text{kg}}} = 0{,}28\ \text{m/s}$$

La velocidad que alcanza el cuerpo en este punto es 0,28 m/s.



2.2 El péndulo simple

2.2.1 El período

Un péndulo simple es un modelo que consiste en una masa puntual suspendida de un hilo de longitud L cuya masa se considera despreciable. La masa oscila de un lado para otro alrededor de su posición de equilibrio, describiendo una trayectoria a lo largo del arco de un círculo con igual amplitud.

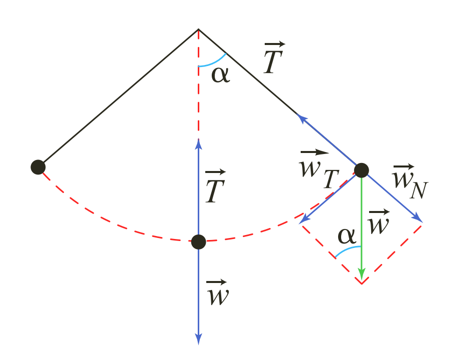


Figura 6. Análisis de las fuerzas que actúan sobre la masa del péndulo cuando está en equilibrio y cuando no lo está.

En la figura 6 se observa que cuando el péndulo está en equilibrio, la tensión *(T)* del hilo se anula con el peso de la masa *(w)*. Cuando el péndulo no está en su posición de equilibrio, el hilo forma un ángulo α con la vertical y el peso se descompone en dos fuerzas:

- Componente del peso, tangencial a la trayectoria

$$w_T = -m \cdot g \cdot \text{sen}\ \alpha$$

- Componente del peso, perpendicular o normal a la trayectoria

$$w_N = m \cdot g \cdot \cos \alpha$$

La tensión del hilo y la componente normal del peso se anulan, por lo tanto, la fuerza de restitución *(F)*, encargada del movimiento oscilatorio, es la componente tangencial del peso, luego:

$$F = w_T = -m \cdot g \cdot \text{sen}\ \alpha$$

La fuerza de restitución es proporcional al sen α, así que el movimiento no es armónico simple. Sin embargo, para ángulos menores de 10°, expresados en radianes, el sen α tiene la propiedad de ser prácticamente igual a la medida de dicho ángulo α; así, para ángulos pequeños tenemos que:

$$F = -m \cdot g \cdot \text{sen}\ \alpha$$

como sen α = α, se obtiene que:

$$F = -m \cdot g \cdot \alpha$$

Como la longitud x del arco, el radio l y el ángulo α se relacionan mediante la expresión $x = l \cdot \alpha$, entonces:

$$F = -\text{m} \cdot \text{g} \cdot \frac{x}{l}$$

Puesto que para un movimiento armónico simple $F = -k \cdot x$, se igualan las dos fuerzas así:

$$-\text{m} \cdot \text{g} \cdot \frac{x}{l} = -k \cdot x$$

$$k = \frac{m \cdot g}{l} \qquad \textit{Al despejar } k$$

En cualquier movimiento armónico simple, el período está dado por $T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{\text{m}}{k}}$, entonces, al remplazar k se obtiene:

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{\text{m}}{\frac{\text{m} \cdot \text{g}}{l}}} \qquad \textit{Al remplazar } k$$

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{l}{\text{g}}} \qquad \textit{Al simplificar}$$

EJERCICIO

Determina la frecuencia de un péndulo simple si se sabe que su período es de 0,5 s.



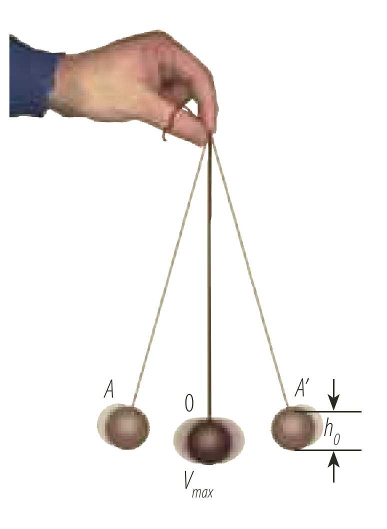


Figura 7. En la posición de equilibrio la energía mecánica del cuerpo es toda cinética, mientras que en los extremos es toda potencial.

El período de oscilación de un péndulo simple, con una amplitud menor de 10°:

- Es directamente proporcional a la raíz cuadrada de la longitud del hilo que sostiene el cuerpo.
- Es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la aceleración de la gravedad.
- No depende de la masa del cuerpo.
- No depende de la amplitud angular.

2.2.2 La energía

En el movimiento armónico simple de un péndulo, en ausencia de fricción, la energía mecánica se conserva. En los extremos *A* y *A'* de la trayectoria del péndulo mostrado en la figura 7, la energía cinética de la esfera es igual a cero, debido a que la velocidad del objeto es cero y la energía potencial gravitacional, medida desde la posición más baja de la trayectoria, es máxima, por lo tanto la energía mecánica es toda potencial. En la posición de equilibrio *O*, la energía cinética es máxima y la energía potencial gravitacional es igual a cero debido a que la altura con respecto al nivel de referencia es cero, por tal razón, toda la energía potencial se transformó en energía cinética y la velocidad del cuerpo es máxima.

EJEMPLOS

1. Para establecer el valor de la aceleración de la gravedad en la superficie lunar, un astronauta realiza una serie de mediciones del período de oscilación de un péndulo de longitud 1 m. Si el valor promedio de los datos obtenidos es 4,92 s, determinar:

a. La aceleración de la gravedad lunar.

b. La relación existente entre las aceleraciones gravitacionales lunar y terrestre.

Solución:

a. Para hallar la aceleración de la gravedad lunar se tiene que:

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{l}{g}}$$

$$g = \frac{4 \cdot 1\ \text{m} \cdot \pi^2}{(T)^2}$$ *Al despejar g*

$$g = \frac{4 \cdot 1\ \text{m} \cdot \pi^2}{(4{,}92\ \text{s})^2} = 1{,}63\ \text{m/s}^2$$ *Al remplazar y calcular*

La aceleración lunar es 1,63 m/s².

b. La relación entre g_{lunar} y $g_{terrestre}$ se realiza por medio de la siguiente expresión:

$$\frac{g_{lunar}}{g_{terrestre}}$$ *Al relacionar*

$$\frac{1{,}63\ \text{m/s}^2}{9{,}8\ \text{m/s}^2} = 0{,}16$$ *Al remplazar y calcular*

La g_{lunar} es aproximadamente 1/6 de la $g_{terrestre}$.

2. Calcular la velocidad máxima ($v_{máx}$) para el péndulo de la figura 7 si la altura del objeto en el extremo *A'* de la trayectoria es h_0.

Solución:

En ausencia de fricción, la energía mecánica se conserva. Por lo tanto, en el extremo de la trayectoria la energía mecánica es:

$$E_m = m \cdot g \cdot h_0$$

y en la posición *O* es:

$$E_m = \frac{1}{2} \cdot \text{m} \cdot v_{máx}^2$$

Como $E_{c\ máx} = E_{p\ máx}$, se tiene que:

$$v_{máx} = \sqrt{2 \cdot g \cdot h_0}$$



2.3 Los sistemas resonantes

2.3.1 Sistemas en fase

Si se hacen oscilar dos péndulos de igual longitud, como los mostrados en la figura 8, los períodos de oscilación de cada uno serán iguales. Por lo cual, si el péndulo 1 se suelta desde la posición A al mismo tiempo que el péndulo 2 desde la posición *A'*, los dos pasarán al tiempo por la posición de equilibrio; sin embargo, se puede observar que en cualquier otra elongación se encuentran en posiciones simétricas. Si detuviéramos uno de los dos péndulos durante un tiempo $T/2$, los dos ocuparían las mismas posiciones. En el primer caso se dice que hay una diferencia de fase; para el ejemplo es media oscilación. En el segundo caso se dice que los péndulos están en fase.

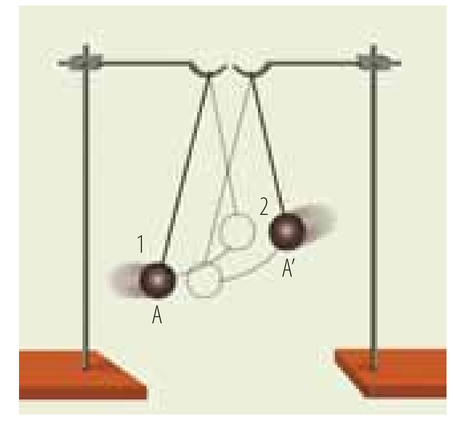


Figura 8. El período de oscilación de los péndulos es igual porque su longitud es la misma.

2.3.2 Oscilaciones amortiguadas

Debido a las fuerzas de rozamiento, en cualquier sistema oscilatorio real siempre se presentan pérdidas de energía. Por ejemplo, en un péndulo o en una masa atada al extremo de un resorte oscilante, su amplitud decrece constantemente a medida que transcurre el tiempo, hasta adquirir el reposo en su posición de equilibrio.

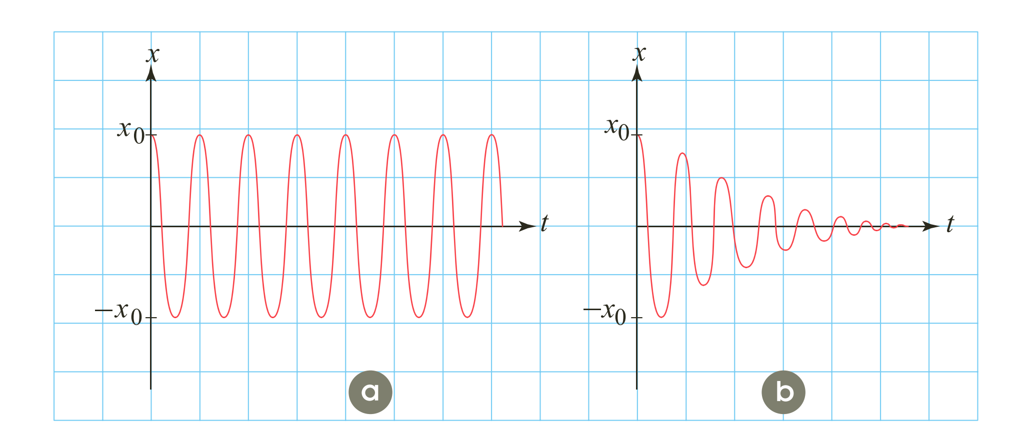
En estos casos el movimiento se denomina armónico amortiguado.

El amortiguamiento corresponde, en general, a la resistencia del aire y a la fricción interna del sistema de oscilación. La energía se disipa, convirtiéndose en energía térmica, reflejada en una menor amplitud de oscilación.

La amortiguación de un sistema se puede presentar de tres formas diferentes: sobreamortiguación, subamortiguación y amortiguación crítica.

- Un sistema es *sobreamortiguado* cuando el amortiguamiento necesita un largo tiempo para alcanzar el equilibrio.
- Un sistema es *subamortiguado* cuando pasa por varias oscilaciones antes de llegar al reposo.
- Un sistema presenta *amortiguamiento crítico* cuando alcanza el equilibrio con mayor rapidez.

En la siguiente figura se puede observar la relación existente entre un movimiento armónico simple (en ausencia de fricción (a)), y un movimiento armónico amortiguado (con presencia de fricción (b)).





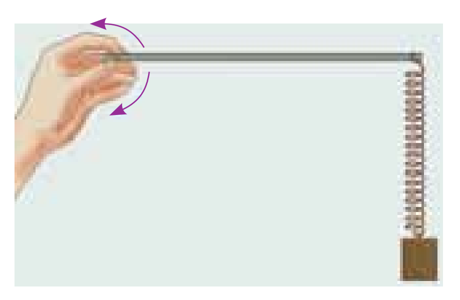


Figura 9. Debido a la resonancia, al aplicar una pequeña fuerza se genera una gran amplitud de oscilación.

2.3.3 Oscilaciones forzadas

Para que un sistema real oscile durante un largo tiempo, es necesario que, por medio de una fuerza externa, recupere la energía perdida durante el rozamiento. Por lo cual, cuando un cuerpo oscilante se somete a una fuerza externa, sus *oscilaciones son forzadas*.

Por ejemplo, considera el movimiento de un columpio. Si no existe la intervención de la persona que se mece, el columpio oscilará con una frecuencia natural o propia y se mantendrá indefinidamente si no hay fricción. Por el contrario, si el columpio se empuja con cierta intensidad, cada vez que alcanza uno de sus extremos de oscilación, la oscilación producida será forzada.

De esta manera, se verifican dos condiciones para mantener o aumentar la amplitud de un sistema oscilante:

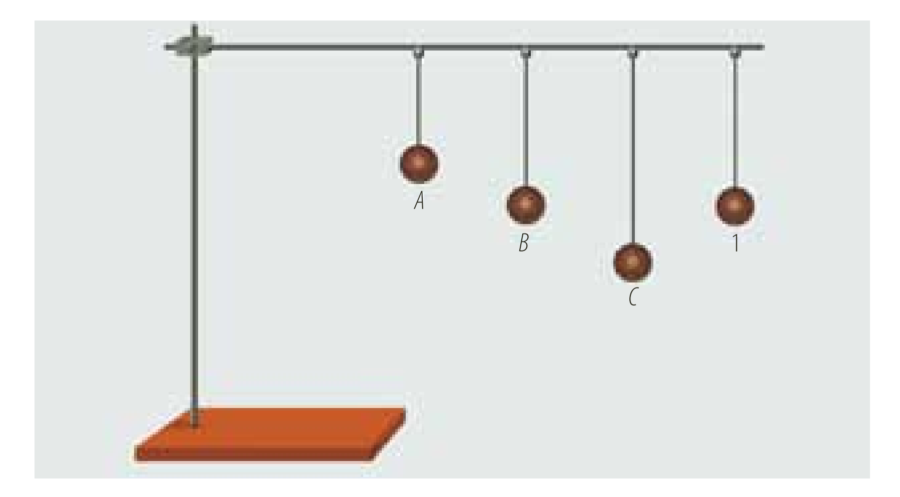
- La fuerza externa es periódica y su frecuencia es igual a la frecuencia propia del sistema.
- La fuerza externa está en fase con el movimiento de oscilación.

Cuando las dos condiciones se cumplen, la amplitud del sistema aumenta hasta un máximo valor, el cual depende de la fuerza externa aplicada y de la elasticidad del material, es decir, existe una *resonancia* entre la fuerza aplicada y el oscilador.

2.3.4 Algunas demostraciones

El fenómeno de resonancia se puede comprender mediante una barra y un resorte en el que está suspendido un objeto. Para ello, se cuelga el resorte en uno de los extremos de la barra y se hace oscilar (figura 9). Una vez esté oscilando, se mueve la barra hacia arriba y hacia abajo con una frecuencia igual a la frecuencia de oscilación del sistema resorte-objeto. Cuando se igualan estas dos frecuencias hay un aumento, cada vez mayor de la amplitud. Aunque la intensidad de la fuerza aplicada es pequeña, la amplitud obtenida es grande.

En la siguiente figura se muestran tres péndulos marcados con las letras *A*, *B* y *C*, los cuales cuelgan de una barra flexible. Uno de ellos tiene la misma longitud del péndulo marcado con el número 1. Cuando ponemos en oscilación el péndulo 1, encontramos que, aunque todos los péndulos oscilan, el péndulo *B* lo hace con mayor amplitud, puesto que tiene la misma longitud que el péndulo 1 y por ende la misma frecuencia, lo que produce una resonancia entre las dos.



Además de las oscilaciones mecánicas, como las de un péndulo, también existen oscilaciones eléctricas, como la corriente alterna, y oscilaciones magnéticas.

En todos los siguientes casos se producen fenómenos de resonancia que tienen mucha aplicación práctica.

- La sintonización de una emisora de radio se basa en la resonancia electromagnética: al girar la perilla del sintonizador, se varía una característica del circuito eléctrico, que cambia el valor de la frecuencia propia del mismo (sería algo semejante a modificar la longitud de un péndulo, por ejemplo). Cuando la frecuencia propia del aparato toma el valor exacto de la frecuencia de la onda, se produce resonancia: el aparato absorbe la energía de la onda y se escucha la señal.
- Una demostración de un sistema resonante ocurrió en noviembre de 1940 cuando el puente Tacoma, en los Estados Unidos, se derrumbó cuatro meses después de haberse inaugurado, debido a que en una tormenta, la fuerza producida por el viento entró en resonancia con la estructura oscilante.

  La transferencia de energía aumentó la amplitud de las oscilaciones del puente, hasta provocar su destrucción (figura 10).

  El puente fue reconstruido con una estructura más rígida y un aumento en la frecuencia de resonancia para evitar que los vientos fuertes lo pusieran en vibraciones resonantes.
- Es del conocimiento popular que los soldados rompen el paso de la marcha cuando cruzan un puente a pie. Si el ritmo de la marcha coincidiera con la frecuencia natural del puente, este comenzaría a vibrar hasta romperse.
- Por otra parte, todos los objetos que se desplazan en el agua, desde los barcos hasta los nadadores, tienen que vencer fuerzas de arrastre debidas a la densidad y a la viscosidad del agua.

  Pero, además, si el objeto o el nadador se desplazan en la superficie de dos medios, agua y aire, por ejemplo, aparece una nueva fuerza de arrastre.

  La superficie del agua sostiene normalmente la presión hacia los lados. Esta nueva fuerza hace que la superficie del agua ascienda y descienda generando olas que se alejan y son detectadas fácilmente por la vista. La interacción del objeto que se mueve con sus propias olas genera una fuerza que lo retarda, llamada el "arrastre de las olas".

  Esta fuerza retardadora es particularmente importante en el nado de mariposa y en el nado de pecho. A velocidades de competencia, esta fuerza de arrastre es más importante que la debida a la viscosidad del agua; por ello, favorece al nadador mantener la mayor parte de su cuerpo dentro del agua.

  En la década de los años cincuenta se descubrió que el nado de pecho es más rápido si el nadador se mantiene bajo del agua. Sin embargo, las reglas de la competencia requieren que el nadador mantenga la cabeza fuera.
- Las moléculas son sistemas que también pueden oscilar y cada una tiene su frecuencia propia. Las ondas emitidas en el horno microondas tienen una frecuencia de ubicación de valor aproximadamente igual a la frecuencia con la cual vibran las moléculas de agua contenidas en los alimentos.

  Cuando las microondas inciden sobre una porción de alimento hacen que las moléculas vibren cada vez con mayor amplitud, lo cual produce un aumento de la energía interna del alimento y, en consecuencia, de la temperatura.



Figura 10. La destrucción del puente Tacoma en Estados Unidos es un ejemplo de un sistema resonante.

Interpreta

1 **Escribe en el recuadro la letra correspondiente a cada elemento del movimiento oscilatorio.**

a. Período.
b. Frecuencia.
c. Oscilación.
d. Amplitud.
e. Elongación.

- [ ] Ciclo que produce un objeto después de ocupar todas las posiciones posibles de la trayectoria.
- [ ] Número de ciclos que realiza un objeto en un segundo.
- [ ] Mayor distancia que alcanza un objeto respecto a la posición de equilibrio.
- [ ] Tiempo que tarda un objeto en realizar una oscilación.
- [ ] Posición que ocupa un objeto respecto a su posición de equilibrio.

2 **Completa la siguiente tabla.**

	Si en $t = 0$, $x_0 = A$	Si en $t = 0$, $x_0 = A \times \cos \varphi_0$
Posición		
Velocidad		
Aceleración		

a. ¿Qué diferencias encuentras entre las ecuaciones de cada columna?

b. ¿Qué explicación física tiene φ_0?

Marca con una ✗ la respuesta correcta en las preguntas 3 a 5.

3 **Uno de los siguientes procesos no lo realiza el motor de cuatro tiempos.**

- [ ] Admisión.
- [ ] Escape.
- [ ] Explosión.
- [ ] Inmersión.

4 **La energía mecánica de un sistema oscilante en los extremos del movimiento depende de:**

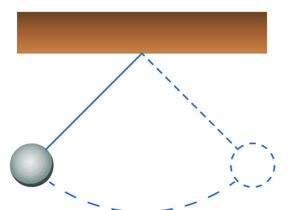
- [ ] La masa.
- [ ] La amplitud.
- [ ] La velocidad.
- [ ] La energía en el punto de equilibrio.

5 **Una oscilación amortiguada no se puede presentar cuando:**

- [ ] Se necesita un largo tiempo para alcanzar el equilibrio.
- [ ] El amortiguamiento lo alcanza en un corto tiempo.
- [ ] La amplitud del movimiento armónico se mantiene constante.
- [ ] Se necesitan varias amortiguaciones para llegar al reposo.

Argumenta

6 **En la figura se muestra la trayectoria que recorre un péndulo simple.**

a. Explica cómo se produce el movimiento del péndulo.

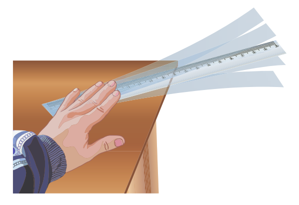
b. Indica la posición de equilibrio y la amplitud del péndulo en la figura.

7 **Explica la diferencia entre movimiento oscilatorio y movimiento periódico.**

8 **Responde. ¿El período de un péndulo depende de su masa? Explica tu respuesta.**

Propone

9 **Al hacer vibrar una regla cuando la golpeas, como se observa en la figura, verás que la amplitud de oscilación del extremo va disminuyendo conforme pasa el tiempo. Esto se debe a que la energía del movimiento se va propagando. A tal movimiento se le denomina movimiento oscilatorio amortiguado.**



a. ¿Qué sucede con la energía que se transmite por la regla?

b. Plantea una opción para que el sistema amortiguado tenga un tiempo de duración mayor.

Actividades

Verifica conceptos

1. **Escribe V, si la afirmación es verdadera o F, si es falsa. Justifica tu respuesta.**
   - ☐ Todo movimiento armónico simple es periódico.
   - ☐ La frecuencia de un movimiento armónico simple es inversamente proporcional al período de oscilación.
   - ☐ La velocidad de un péndulo no cambia durante una oscilación completa.
   - ☐ La aceleración de un objeto que describe un movimiento armónico simple es proporcional a la elongación.
   - ☐ En un motor de cuatro tiempos la explosión se da cuando la válvula de admisión se cierra y sube el pistón comprimiendo la mezcla.

2. **Define los siguientes conceptos:**
   a. Período.
   b. Frecuencia.
   c. Movimiento armónico simple.
   d. Movimiento circular uniforme.
   e. Velocidad angular.

Selecciona la opción correcta en las preguntas 3 y 4.

3. **¿Cuál es la frecuencia de un péndulo simple si su período es 0,5 s?**
   a. 0,25 Hz c. 1 Hz
   b. 0,5 Hz d. 2 Hz

4. **¿Cuál es la frecuencia de un sistema masa-resorte si $m = 4$ kg y $k = 1$ N/m?**
   a. 4 Hz c. 0,25 Hz
   b. 1 Hz d. 0,5 Hz

5. **Comprueba a partir de un movimiento circular uniforme que la ecuación de la posición para un movimiento armónico simple, en función del tiempo cuando parte de la posición inicial, está dada por la expresión:**

$$x = A \times \cos \omega t$$

6. **Realiza un cuadro comparativo, donde muestres similitudes y diferencias, entre el movimiento de un péndulo y el movimiento de una masa ligada a un resorte.**

Analiza y resuelve

7. **Responde. ¿De qué depende el período de oscilación de un sólido sujeto desde algún punto de oscilación?**

8. **Responde. ¿Qué es necesario para que un movimiento sea considerado como oscilatorio?**

9. **Considera los sistemas masa-resorte A y B. La constante elástica del sistema A es cuatro veces mayor a la del resorte del sistema B. La masa del sistema A es cuatro veces mayor a la del sistema B. ¿Para cuál de los sistemas es mayor la frecuencia de oscilación? Explica tu respuesta.**

10. **En la bicicleta se pueden observar diferentes movimientos oscilatorios. Explica uno de ellos.**

11. **El cometa Halley gira alrededor del Sol en dirección contraria a los planetas del sistema solar y da una vuelta completa en su órbita cada 75 o 76 años en promedio. Si se considera este evento como periódico, ¿es cierto afirmar que el movimiento del cometa Halley es un movimiento oscilatorio? ¿Por qué?**

12. **Una pelota atada a una raqueta con una banda elástica se puede considerar un movimiento periódico cuando es golpeada contra la raqueta. Explica por qué.**

13. **Observa las imágenes y explica los movimientos que allí se ven.**



Actividades

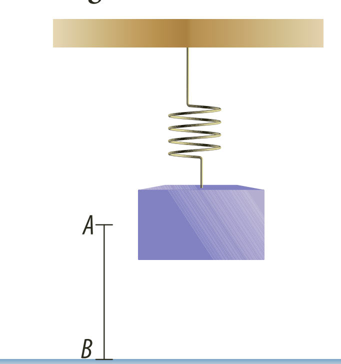
Problemas básicos

14 **La rueda de una bicicleta realiza 180 giros en 5 min. Halla el período y la frecuencia del movimiento.**

15 **Dos péndulos simples de igual longitud son soltados desde posiciones que forman ángulos de 5° y 10° con la vertical, respectivamente. Si T_5 y T_{10} son los tiempos que tardan dichos péndulos en adquirir por primera vez sus máximas velocidades, entonces, ¿cuál es el valor de T_5/T_{10}?**

16 **Un resorte realiza 10 oscilaciones en 2 s. Calcula su frecuencia en hercios y su período de oscilación en segundos.**

17 **En un sistema masa-resorte se comprime el resorte hasta la posición A y se suelta como se muestra en la figura.**



a. Describe el movimiento de la masa para cuando hay fricción y cuando no hay fricción con el aire.

b. Si la masa oscila 20 veces en un minuto, ¿cuál es el valor del período y la frecuencia?

18 **Un cuerpo experimenta un movimiento armónico simple (MAS) con un período de 2 s. La amplitud de oscilación es de 3 m. Si en el instante inicial se encuentra el objeto en uno de los extremos de la trayectoria, halla:**

a. Las ecuaciones para la elongación, la velocidad y la aceleración del objeto.

b. La elongación, la velocidad y la aceleración cuando $t = 1$ s.

19 **Un cuerpo describe un movimiento armónico simple, de acuerdo con la expresión**

$$x = 2\cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot t + \pi\right)$$ **con unidades en el SI.**

Determina:

a. La amplitud, la frecuencia angular, el período y la constante de fase.

b. Las funciones de velocidad y aceleración del movimiento.

c. La aceleración en función de la elongación x.

20 **Un móvil realiza un movimiento armónico simple de acuerdo con la ecuación**

$$x = 2\cos\left(\frac{\pi}{4} \cdot t\right)$$ **con unidades en el SI. Halla:**

a. La amplitud, velocidad angular, el período y la constante de fase del movimiento.

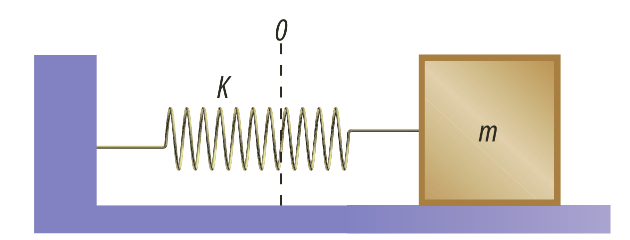
b. La velocidad y aceleración máximas.

21 **Un cuerpo experimenta un movimiento armónico simple de período 3 s y amplitud de oscilación de 1 m. Si al iniciar el movimiento el cuerpo se encuentra en el extremo negativo de la trayectoria, halla:**

a. Las funciones respecto al tiempo de elongación, velocidad y aceleración.

b. La elongación, velocidad y aceleración cuando ha transcurrido un segundo.

22 **En la figura se ilustra una masa de 4 kg ligada a un resorte de constante elástica 100 N/m. El sistema se pone a oscilar en un plano horizontal sin fricción.**



Determina si cada una de las siguientes afirmaciones es correcta o incorrecta. Luego, justifica.

a. El período del movimiento depende de la amplitud de oscilación.

b. El valor de la velocidad angular es de 5 rad/s.

c. El período de oscilación es aproximadamente 1,256 s.

d. Si el sistema se pone a oscilar verticalmente, el período será diferente.

23 **Un movimiento armónico simple es descrito por la función $x = 0{,}05\cos(2\pi t + \pi\pi)$. Halla la amplitud y período de la masa.**



Problemas de profundización

24 Un resorte se estira una distancia x con un bloque de masa m atado a su extremo y luego se suelta. ¿A qué distancia del equilibrio alcanza la cuarta parte de su velocidad máxima?

25 Un cuerpo de 2 kg está unido a un soporte horizontal de constante elástica $k = 2.000$ N/m. Si se alarga 10 cm el resorte y se deja libre, ¿cuál es la frecuencia y cuál es el período?

26 Se tiene un sistema masa-resorte el cual tiene un período de 8π cuando la masa suspendida es de 16.000 g. Calcula el valor de la constante de elasticidad del resorte.

27 Un objeto describe un movimiento armónico simple con una velocidad angular de 10π rad/s y amplitud 5 cm. Si el objeto se encuentra en un punto P_0 a $\pi/4$ de la posición de equilibrio, halla:

a. La posición del objeto P_0.

b. La posición del objeto 0,5 s después de haber pasado por el punto P_0.

c. La velocidad al cabo de 0,5 s.

28 Una masa de 0,5 kg ligada al extremo de un muelle elástico tiene un período de 0,3 s. Si la amplitud del movimiento es 0,1 m. Halla:

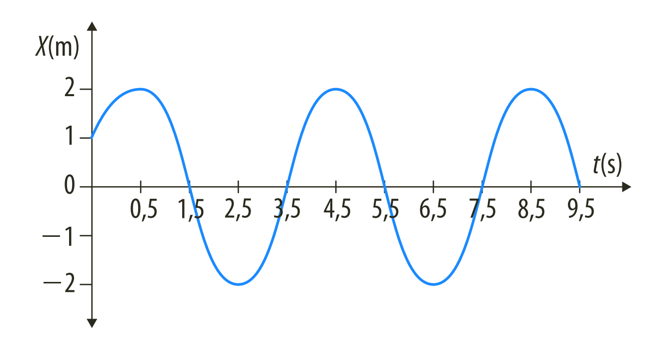
a. La constante del muelle.

b. La frecuencia del muelle.

c. La velocidad máxima que alcanza el muelle.

d. La máxima aceleración alcanzada por el objeto.

29 La gráfica de elongación que se muestra en la figura representa un movimiento armónico simple.

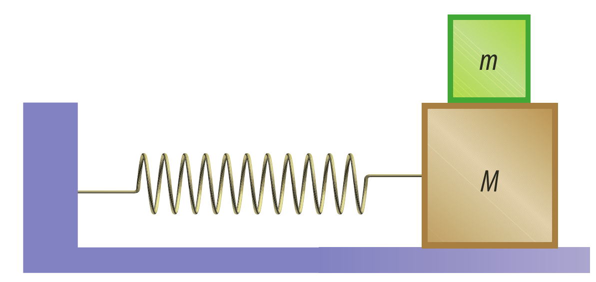


Con base en la información de la gráfica, halla la constante de fase y el período.

30 Una masa suspendida de un resorte se encuentra describiendo un movimiento oscilatorio cuando la distancia desplazada por la masa es de 40 cm, la fuerza en el resorte es de 2,5 N y el período de oscilación es de 3 s. ¿De qué valor será la masa suspendida?

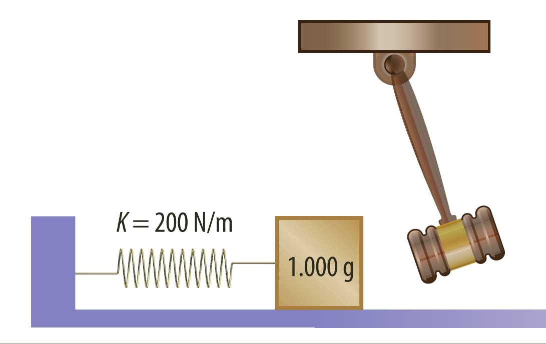
31 Un bloque de madera se sujeta al extremo de un muelle vertical, y el conjunto vibra con un período de 0,5 s. Si la velocidad del bloque es de 0,2 m/s, cuando pasa por la posición de equilibrio, calcula la amplitud del movimiento y su aceleración máxima.

32 Una masa es colgada desde el extremo libre de un resorte vertical, de tal manera que la deformación causada hasta su posición de equilibrio es de 0,8 m. Calcula el período de oscilación del sistema si este es perturbado.



33 Sobre una superficie horizontal sin rozamiento, los bloques de la figura unida a un resorte de constante k oscilan con una amplitud A. En el momento en que alcanza la posición de máxima amplitud A, se retira el bloque de masa m. Determina el cociente entre las rapideces máxima inicial y después del cambio (v_1/v_2), si $m = M/2$.

34 Cuando $t = 0$, un cuerpo de masa 1.000 kg en reposo en el extremo de un resorte horizontal con constante elástica 200 N/m, como se muestra en la figura, es golpeada por un martillo que le transmite 3,2 m/s de velocidad inicial. Encuentra el período y la frecuencia del movimiento.



Actividades

Verifica conceptos

1 **Escribe V, si el enunciado es verdadero o F, si es falso. Justifica tu respuesta.**

- ☐ En los extremos de la trayectoria de un movimiento armónico simple la energía cinética es cero.
- ☐ La energía potencial máxima se encuentra en el punto de equilibrio del movimiento armónico simple.
- ☐ El período de un péndulo depende de la masa que él posee.
- ☐ Al aumentar la longitud de un péndulo el período de oscilación aumenta.
- ☐ En los sistemas amortiguados la amplitud decrece hasta detenerse el objeto oscilante.
- ☐ Para realizar un movimiento con una oscilación forzada no es necesario utilizar una fuerza externa.
- ☐ Para un objeto con movimiento armónico simple cuya amplitud es A, la energía cinética es igual a la potencial en la posición $x = A/2$.
- ☐ Para aumentar la energía de un sistema oscilante es necesario que la fuerza externa entre en resonancia con el sistema.

2 **Establece diferencias entre:**

a. La energía cinética y la energía potencial de un sistema oscilante.

b. El período de un péndulo simple y un sistema masa-resorte.

c. Las oscilaciones amortiguadas y las oscilaciones forzadas.

d. La frecuencia natural y la frecuencia de resonancia.

3 **La energía mecánica asociada a un sistema masa-resorte que oscila horizontalmente es de 32 J. La constante elástica del resorte de masa despreciable es 400 N/m. ¿Cuáles de las siguientes afirmaciones son correctas?**

a. La amplitud del movimiento es 0,4 m.

b. En los extremos de la trayectoria la energía potencial es nula.

c. En el punto central de la trayectoria la energía cinética es máxima.

d. Para una elongación de $0,2\sqrt{2}$ m, la energía potencial elástica tiene el mismo valor que la energía cinética.

e. La energía mecánica del sistema cambia durante todo el movimiento.

Analiza y resuelve

4 **Un péndulo simple de longitud L y masa m oscila con un período T. La cuerda del péndulo no se puede extender y se desprecia su masa. Si la longitud L varía podemos afirmar que:**

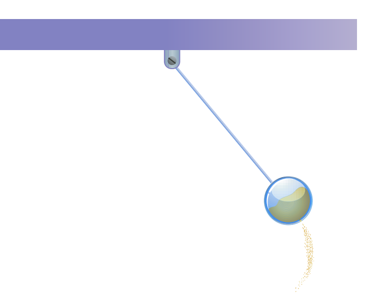
a. La frecuencia de oscilación disminuye.

b. Manteniendo la longitud constante y aumentando la masa m, el período aumenta.

c. Manteniendo constante la longitud de la cuerda del péndulo, si se traslada el péndulo a otro lugar donde la aceleración de la gravedad es mayor, el período aumenta.

d. Durante la oscilación, al pasar por la posición de equilibrio la tensión de la cuerda es igual al peso del péndulo.

5 **Se construye un péndulo que tiene suspendida una esfera llena de arena con un orificio en la parte inferior, como se muestra en la figura. Mientras el péndulo oscila, la arena va saliendo por el orificio. Se observa que el período de oscilación primero aumenta y luego, disminuye. Explica por qué sucede esto.**



6 **Explica qué sucede con la energía del péndulo que se muestra en la figura, y explica cómo es el movimiento del objeto.**





Problemas básicos

7 **Las masas oscilantes de dos péndulos simples son de 30 g y 50 g, respectivamente, y la longitud del hilo del primer péndulo es el doble que la del hilo del segundo péndulo. ¿Cuál de los dos péndulos tendrá un período mayor?**

8 **Un resorte es estirado hasta alcanzar los 2 m y se pone a vibrar longitudinalmente por un vibrador aplicado en uno de sus extremos. Cuando la frecuencia de excitación es de 6 Hz, se observan en el resorte cuatro amplitudes máximas. ¿Cuál es la velocidad de las ondas de compresión en el resorte?**

9 **Un resorte de constante elástica de 120 N/m oscila entre los puntos *A* y *B* separados entre sí 16 cm. Si despreciamos la fricción, ¿cuál es la energía asociada al sistema?**

10 **Un cuerpo de 4 kg oscila, apoyado en un plano horizontal, vinculado a un resorte de 200 N/m. Todas las fricciones son despreciables. Si la amplitud es 10 cm, calcula:**

a. La máxima energía potencial.

b. La velocidad máxima.

c. La aceleración máxima.

11 **Un cuerpo de masa 1.000 kg oscila atado a un resorte de constante elástica de 300 N/m. Se estira 0,15 m a partir de su posición de equilibrio y se suelta. Calcula la distancia que se aleja de la posición de equilibrio en el otro extremo de la trayectoria, si en el recorrido hasta él se disipa el 40% de la energía mecánica a causa de la fricción.**

12 **Un astronauta puso a oscilar un péndulo en la Luna con el fin de medir el campo gravitatorio de nuestro satélite natural, y registró un período de 2,45 s. Si en la Tierra, el mismo péndulo registró un período de 1 s, ¿cuál es la relación entre la gravedad de la Luna y la de la Tierra?**

13 **Un péndulo simple de un metro de longitud realiza 90 oscilaciones en 3 minutos. Calcula el valor de la aceleración de la gravedad en m/s^2.**

14 **Un péndulo tiene una longitud de 4 m. Calcula la frecuencia de oscilación del péndulo considerando $g = \pi^2$ m/s^2.**

15 **Calcula la gravedad de cierto planeta si se sabe que el período de un péndulo en la Tierra aumenta 50% cuando es llevado a la superficie de dicho planeta.**

16 **Un cuerpo de masa m está ligado a un resorte y oscila con una amplitud de 10 cm. Si la constante elástica del resorte es 25 N/m, determina la energía total de movimiento.**



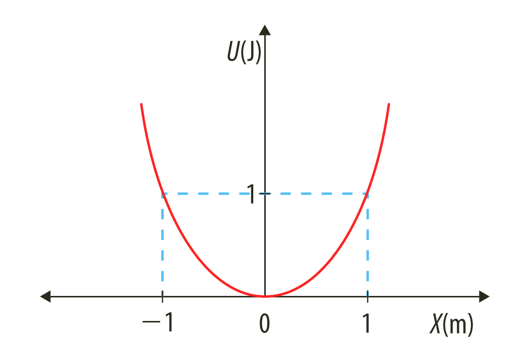
Problemas de profundización

17 **En la superficie del agua de una piscina se programan ondas cuya frecuencia es de 4 Hz y cuya amplitud es de 5 cm. Si se sabe que las ondas tardan 10 s en recorrer 2 m, calcula el período, la frecuencia y la longitud de esas ondas.**

18 **En una fábrica se busca investigar cuáles son los efectos de un choque frontal entre un automóvil familiar y otro vehículo de mayor masa. Para esta simulación se utiliza un gran péndulo que tiene 20 m de longitud y una masa que es cuatro veces la del automóvil. Determina cuál debe ser el ángulo de este péndulo para que en el momento del choque su velocidad sea de 70 km/h.**

19 **Considera un movimiento armónico simple de un cuerpo de masa *m*, ligado a un resorte de constante elástica *k*. Escribe tres formas diferentes de expresar la energía mecánica del sistema.**

20 **A una partícula de masa 0,5 kg se le asocia una energía potencial *U(x)*, cuya gráfica está representada en la figura. La figura es una parábola que pasa por el origen. La partícula inicia su movimiento a partir del reposo en $x = -20$ m.**



Sobre la situación es falso afirmar que:

a. La energía mecánica de la partícula es 8 J.

b. La velocidad de la partícula cuando pasa por $x = 0$ es de 40 m/s.

c. En $x = 0$, la aceleración de la partícula es cero.

d. Cuando la partícula pasa por $x = 1$ m su energía cinética es de 3 J.

Justifica la opción escogida.

Sistema masa-resorte

Un cuerpo describe un movimiento armónico simple cuando la única fuerza que actúa sobre él se expresa de la forma $F = 2k \cdot x$ donde k es una constante.

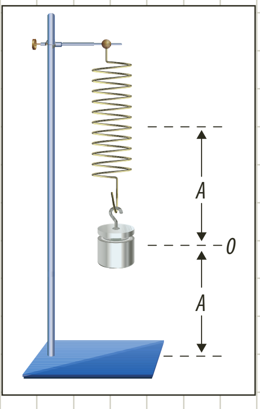
Conocimientos previos

Período, amplitud y ley de Hooke.

Materiales

- Regla
- Resorte
- Masas de diferente peso
- Soporte
- Cronómetro

Procedimiento



1. Suspende una masa del resorte, hasta que se equilibre. Aléjala de la posición de equilibrio una distancia de 3 cm y suéltala para que oscile. La distancia que se alejó la masa de la posición de equilibrio es la amplitud del movimiento.
2. Mide el tiempo que tarda el objeto en realizar 10 oscilaciones y a partir de este dato determina el período de oscilación. Registra los valores de la masa y del período en una tabla como la siguiente.

Masa m (kg)	Período	
	T(s)	T^2 (s^2)

3. Repite el paso anterior para varias masas, teniendo en cuenta que la distancia que se aleja la masa de la posición de equilibrio sea la misma.
4. Calcula el cuadrado del período en cada caso y regístralo en la tabla.
5. Representa los datos del período T y de la masa m en un plano cartesiano. Asigna el eje horizontal a la masa medida en kilogramos y el eje vertical, al período medido en segundos.
6. Representa los datos del período al cuadrado, T^2, en función de la masa, m, en un plano cartesiano. Asigna el eje horizontal a la masa medida en kilogramos y el eje vertical, a T^2. La gráfica obtenida debe ser una recta.
7. Calcula la pendiente de la gráfica T^2 en función de m.
8. Para determinar si el período de oscilación depende de la masa que oscila, utiliza una de las masas, mide el tiempo que emplea en hacer 10 oscilaciones y determina el período de oscilación para una amplitud de 1 cm. Repite el mismo procedimiento otras dos veces y registra los datos en una tabla como la siguiente.

Amplitud 1 cm	
1ª medida	
2ª medida	
3ª medida	
Período promedio	

9. Repite el anterior procedimiento para amplitudes de 3 cm y 5 cm y registra los valores en la tabla.

Amplitud (cm)	Período (s)
1 cm	
3 cm	
5 cm	

Análisis de resultados

1. Puesto que $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$, se cumple que
   $$T^2 = \frac{4\pi^2}{k} \cdot m.$$
   A partir de la pendiente de la gráfica de T^2 en función de m determina el valor de la constante del resorte.
2. ¿Qué sucede con el período de oscilación cuando se ponen a oscilar objetos de diferentes masas?
3. ¿Qué sucede con el período de oscilación cuando se varía la amplitud y el cuerpo sujeto al resorte es el mismo?

El péndulo

En general, un péndulo, al oscilar no describe un movimiento armónico simple, solo se cumple esta condición para pequeñas amplitudes angulares, es decir, cuando el ángulo que forma el hilo con la vertical es menor de 10°. Para estos valores de la amplitud angular el período de oscilación del péndulo se expresa como:

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{l}{g}}$$

Donde l es la longitud del hilo y g es el valor de la gravedad. En esta práctica comprobaremos si el período del péndulo depende de la masa del mismo.

Conocimientos previos

Movimiento armónico simple, período y oscilaciones.

Materiales

- Soporte
- Hilo
- Tres masas de diferente peso
- Regla
- Cronómetro
- Transportador

Procedimiento

1. Construye un péndulo con una de las masas y el hilo. Para determinar cómo influye la masa que oscila en el período del péndulo, en este experimento utilizaremos amplitudes angulares de 10° y no variaremos la longitud del hilo. Mide el tiempo que tarda el péndulo en hacer 10 oscilaciones y determina el período de oscilación. Repite la misma medida otras dos veces y registra los datos en una tabla como la siguiente.

Masa de la pesa	
1ª medida	
2ª medida	
3ª medida	
Período promedio	

2. Cambia la masa del péndulo y determina el período de oscilación. Repite el procedimiento otras dos veces y registra los datos en una tabla como la del numeral 1.
3. Coloca la tercera masa y repite las mediciones del paso anterior. Registra los datos en una tabla como la del numeral 1.
4. Registra los valores promedios del período en una tabla.

Masa de la pesa	Período (s)

Amplitud angular
l
Amplitud constante
m
l constante

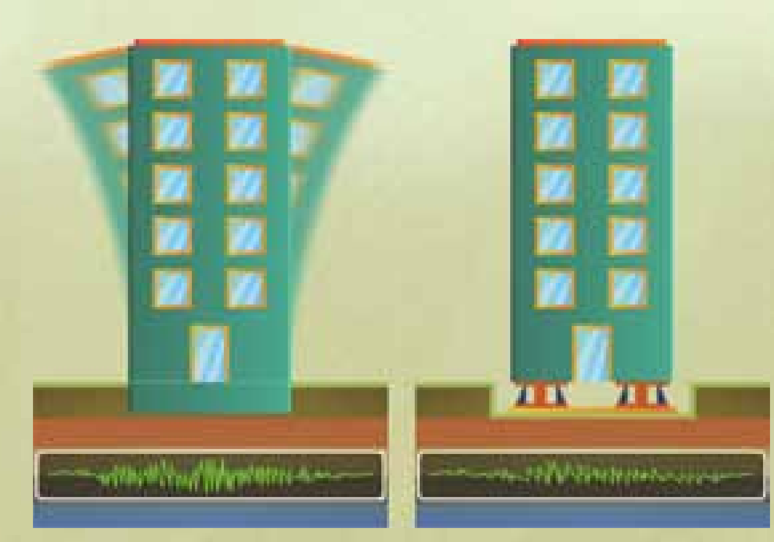
Análisis de resultados

1. Compara los resultados obtenidos para las diferentes masas. ¿Encuentras alguna variación significativa en el período al variar la masa del péndulo?
2. ¿Qué puedes concluir acerca de la dependencia del período de un péndulo con respecto a la masa?

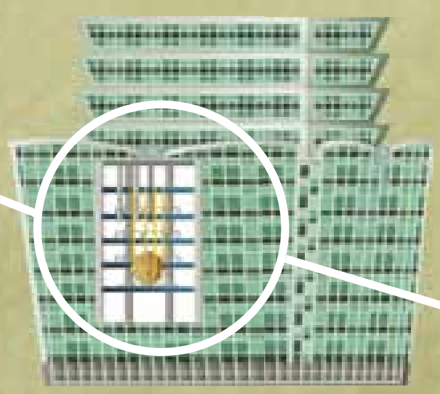
Aisladores

En la actualidad, se hace necesario construir estructuras a prueba de sismos, en especial, cuando se trata de grandes edificios o puentes que comunican ciudades. Los aisladores sísmicos permiten que una edificación tenga mayor tolerancia a los sismos, amortiguando el movimiento que generan las placas terrestres y disipando la energía que se libera.

Los países que desarrollan mayor parte de esta tecnología son China y Japón debido a la mayor tendencia que tienen a sufrir desplazamientos de su superficie terrestre.



Una de las técnicas utilizadas son los amortiguadores elastométricos, construidos con láminas de acero y goma intercaladas para aumentar el período de oscilación de la estructura de 2 a 3 segundos, disminuyendo las aceleraciones sísmicas.



Otra de las técnicas utilizadas para reducir las oscilaciones sísmicas es por medio de un gran péndulo como en el edificio Taipéi 101 construido en Taipéi (Taiwán).

sísmicos

Diseño de un amortiguador elastométrico

En el centro hay un disipador de energía hecho de plomo.

La placa superior de montura conecta al aislador con la parte inferior de la estructura.

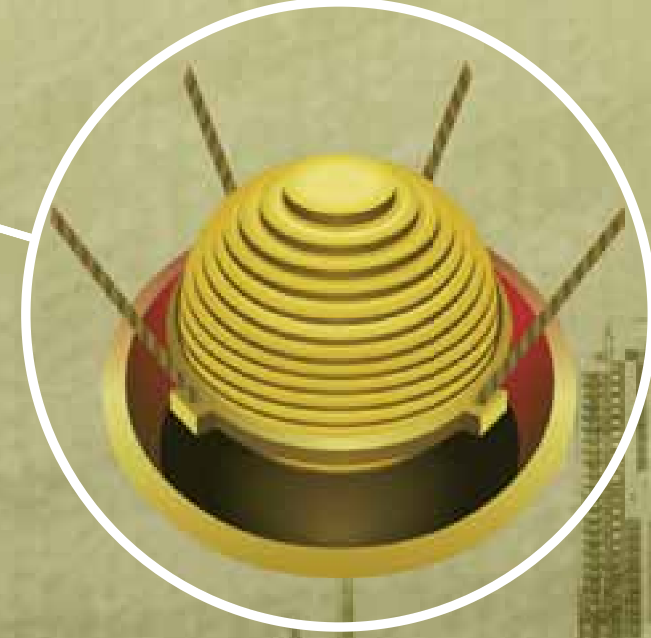
Las placas de acero refuerzan la resistencia de la estructura.

Las cubiertas de caucho ayudan a proteger las placas de acero.

La placa inferior conecta el aislador con la base de la edificación.

El edificio de los Ángeles City Hall, construido en Estados Unidos, cuenta con el sistema de amortiguación elastométrica.





Gracias al péndulo gigante de 680 toneladas sostenido por fuertes tensores y bombas hidráulicas el edificio puede soportar temblores hasta de 7 grados en la escala de Richter.



UNIDAD 2

Las ondas

Temas de la unidad

1. Propagación de las ondas
2. Fenómenos ondulatorios



Para pensar…

Es muy probable que alguna vez hayas estado largo tiempo observando las ondas producidas sobre la superficie del agua en un estanque, al lanzar un objeto o caer una gota sobre ella; o quizás el movimiento de las olas del mar. Un espectáculo entre mágico y misterioso que sin importar la edad nos atrae.

La mayoría de los fenómenos físicos, como el sonido, la luz y los sismos, se producen porque algo que vibra en algún lugar, genera ondas que viajan por un medio material o por el espacio. En este mismo instante miles de ondas de radio, de televisión, de radiación ultravioleta y pequeñas vibraciones sísmicas circulan a nuestro alrededor.

Las comodidades con las que contamos en nuestra cotidianidad, como la Internet, la telefonía móvil, la televisión por cable, el horno microondas, los teléfonos inalámbricos, entre otras, se deben a la aplicación, comprensión y buen uso que el hombre ha logrado del movimiento ondulatorio.

Por ello, en esta unidad estudiaremos la propagación de las ondas y los fenómenos que suceden cuando estas cambian de medio, encuentran obstáculos o se superponen con otras ondas.

Para responder…

- ¿Qué fenómenos físicos generan ondas?
- ¿Qué otros fenómenos conoces que producen ondas?
- ¿Cómo puedes producir una onda? Nombra un ejemplo.



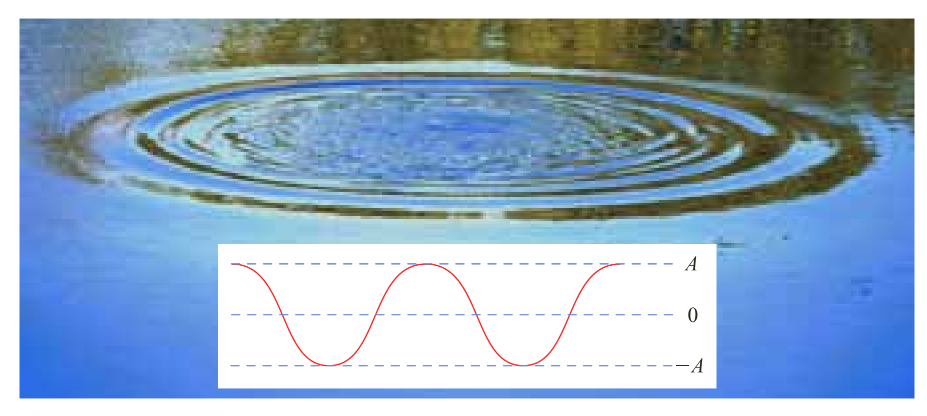
Figura 1. En el estadio las personas son el medio a través del cual se propaga la onda.

1. Propagación de las ondas

1.1 Formación de las ondas

En la figura 1 se aprecia una ola realizada por los espectadores de un partido de fútbol. Al levantarse una persona de su silla y volverse a sentar, realiza un movimiento vertical, que es imitado por las personas situadas a su alrededor. Este movimiento, que es propagado por los asistentes al estadio, se transfiere perpendicularmente al movimiento que realiza cada persona. El movimiento que realiza cada persona en el estadio se denomina *pulso*.

Un caso similar a esta situación ocurre con la caída de una gota sobre la superficie del agua en un estanque. La gota produce una perturbación en el agua, que se propaga hasta la orilla del estanque, en círculos concéntricos. Aunque esta propagación se mueve con determinada velocidad, las partículas de agua no avanzan, simplemente se mueven hacia arriba y hacia abajo con respecto al punto de equilibrio. En la siguiente figura se puede observar la propagación de una perturbación en la superficie del agua (a) y un corte transversal de la misma (b).



De manera similar se pueden producir perturbaciones en la cuales las ondas se propagan en pulsos rectos; por ejemplo, al golpear suavemente la superficie del estanque con el borde de una regla. En la siguiente figura se ilustra una manera simplificada de representar las ondas en la superficie del agua.





Las líneas que se observan en la figura unen todos los puntos de la superficie del agua que se encuentran, en ese instante, en el mismo estado de vibración. Cada una de estas líneas se denomina *frente de onda*. Cuando la propagación sucede a lo largo de la superficie del medio, se producen *frentes de onda planos*. Si se presenta una perturbación en un punto de la superficie del medio, se generan *frentes de onda circulares*.

Estos movimientos que se producen a través de un medio material de propagación se denominan *movimientos ondulatorios*. En un movimiento ondulatorio se difunde energía entre dos puntos del medio sin que haya transporte de materia.

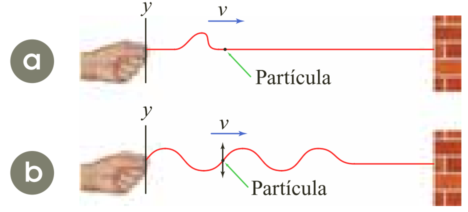
Según el medio de propagación, las ondas se clasifican en ondas mecánicas y ondas electromagnéticas.

- *Ondas mecánicas:* las ondas mecánicas difunden energía a través de un medio elástico (sólido, líquido o gaseoso). Por ejemplo, las ondas en las cuerdas, en el agua y las sonoras.
- *Ondas electromagnéticas:* las ondas electromagnéticas se propagan en el vacío. Difunden energía por las oscilaciones de campos eléctricos y campos magnéticos. Por ejemplo, la luz, la radiación ultravioleta y los rayos X.

Figura 2. Los puntos *P* y *Q* de la onda están en fase.

1.2 Ondas periódicas

Al tomar una cuerda estirada y aplicarle un movimiento vertical en uno de sus extremos, se genera un pulso que viaja a través de la cuerda. Cada partícula de la cuerda permanece en reposo hasta cuando el pulso llega hasta ella, donde se mueve durante un instante y regresa al reposo (como se muestra a continuación en la parte a de la figura). Si se mantiene constante el movimiento en el extremo de la cuerda, la propagación a lo largo de la cuerda será periódica y producirá un tren de ondas (b).



Cuando la perturbación local que origina la onda se produce en ciclos repetitivos, se dice que la onda es *periódica*. Si el movimiento de la perturbación es armónico simple y no existe amortiguamiento, la onda que se propaga se denomina *onda armónica*.

Para estudiar los fenómenos relacionados con movimientos ondulatorios se pueden hacer representaciones de las ondas, como la que se muestra en la figura 2.

En ella se observan las siguientes características:

- *La longitud de onda* (λ): es la distancia entre dos puntos en los que empieza a repetirse al movimiento; por ejemplo, entre dos crestas (puntos altos de la onda) o entre dos valles (puntos bajos de la onda). Cuando la onda se propaga, hay puntos, como *P* y *Q* (figura 2), que en todo instante tienen el mismo estado de vibración, es decir, están en fase.
- *La amplitud de onda (A):* es la distancia máxima que alcanza una partícula con respecto a su posición de equilibrio.
- *La frecuencia (f):* es el número de ondas generadas en la unidad de tiempo. Al igual que en el movimiento armónico simple, su unidad en el SI es el hercio (Hz).
- *El período (T):* es el tiempo en el cual se produce una onda, que coincide con el tiempo que tarda un punto en dar una vibración completa.
- La *velocidad de propagación (v):* es la velocidad con la que se desplaza la perturbación por el medio. Depende de la elasticidad y de la rigidez del medio.

EJERCICIO

Si la velocidad de una onda es de 36 km/h y su frecuencia es de 2 Hz, determina la longitud de onda en centímetros.

Como la onda se desplaza una longitud de onda λ en el tiempo de un período T, la velocidad de propagación es constante y se expresa:

$$v = \frac{\lambda}{T}$$

En todos los movimientos periódicos el período y la frecuencia se relacionan de la siguiente manera:

$$T = \frac{1}{f}$$

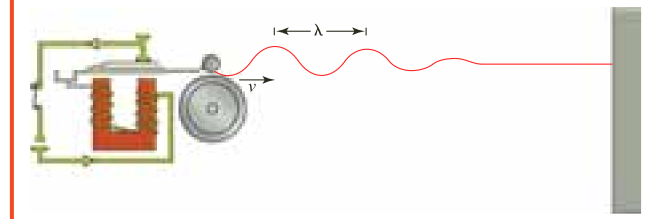
Al remplazar esta expresión en la ecuación de velocidad de propagación, obtenemos que la velocidad de propagación es:

$$v = \lambda \cdot f$$

Por lo tanto, la velocidad de propagación de las ondas, en todas las direcciones, tiene el mismo valor y su magnitud depende del medio de propagación. Por ejemplo, las ondas sonoras se propagan en el agua a una velocidad de 1.500 m/s y en el aire a 340 m/s.

EJEMPLOS

1. **Una placa vibrante de un timbre eléctrico está unida a una cuerda por su extremo libre, tal como se muestra en la figura. Al sonar la campanilla, la placa empieza a vibrar con una frecuencia de 20 Hz, dando origen a una onda de amplitud 1 cm. Si la onda se propaga en la cuerda con una longitud de onda de 44 cm, determinar:**
   a. La velocidad de propagación de la onda.
   b. Esta velocidad si su amplitud se reduce a la mitad.
   c. ¿Qué condiciones deben cambiar para que en la cuerda se produzca una longitud de onda de 22 cm?



Solución:

a. La velocidad de propagación se calcula por:

$v = 0{,}44 \text{ m} \cdot 20 \text{ s}^{-1}$ — *Al remplazar*

$v = 8{,}8 \text{ m/s}$ — *Al calcular*

El movimiento ondulatorio se propaga con una velocidad de 8,8 m/s.

b. Al analizar la ecuación de velocidad de propagación notamos que, para un mismo medio, la amplitud de la onda no influye. Cada parte de la cuerda vibrará con menos energía, pero se propagará con la misma velocidad, es decir, $v = 8{,}8$ m/s.

c. Como el medio de propagación de la onda es la misma cuerda, su velocidad no cambia. Por lo tanto:

$v = \lambda \cdot f$

$f = \frac{v}{\lambda}$ — *Al despejar f*

$f = \frac{8{,}8 \text{ m/s}}{0{,}22 \text{ m}} = 40 \text{ Hz}$ — *Al remplazar y calcular*

En un mismo medio de propagación, la longitud de la onda se reduce a la mitad si la fuente de vibración duplica la frecuencia, para este caso: 40 Hz.

2. **La emisora de radio favorita de Gustavo tiene una frecuencia de 88,9 MHz. Calcula la longitud de onda si esta se propaga en el aire con velocidad igual a 300.000 km/s.**

Solución:

La longitud de onda se calcula por medio de la ecuación $v = \lambda \cdot f$; se despeja: $\lambda = \frac{v}{f}$

Por lo tanto: $1 = \frac{3\ 3\ 10^8 \text{ m/s}}{88{,}9\ 3\ 10^6 \text{ s}^{-1}} = 3{,}38 \text{ m}$

La longitud de onda de la emisora es 3,38 metros.

1.3 Ondas longitudinales y transversales

La dirección de propagación de una onda puede ser paralela o perpendicular a la dirección del movimiento de las partículas del medio en el que se propaga. De acuerdo con esto, existen dos tipos de ondas: longitudinales y transversales.

Definición

Las ondas longitudinales son aquellas en las que las partículas del medio oscilan en dirección paralela a la dirección en que se propaga el movimiento ondulatorio.

Una onda longitudinal siempre es mecánica y se debe a las sucesivas compresiones (estados de máxima densidad y de presión) y expansiones (estados de mínima densidad y de presión) del medio. Son ejemplos de ondas longitudinales las producidas por un resorte cuando se hace oscilar uno de sus extremos en la misma dirección del resorte (figura 3) y las de sonido.



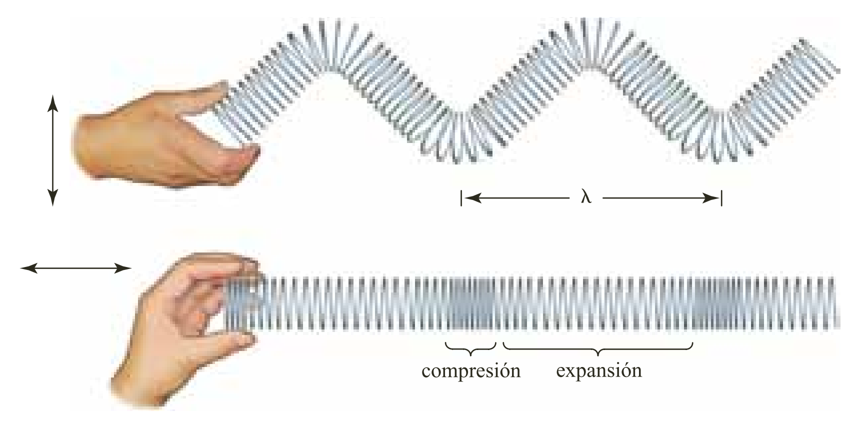
Figura 3. Onda longitudinal producida en un resorte al hacer oscilar uno de sus extremos en la misma dirección del resorte.

Definición

Las ondas transversales son aquellas en las que las partículas del medio oscilan en dirección perpendicular a la dirección en que se propaga el movimiento ondulatorio.

Las ondas generadas en un estanque de agua, las generadas en la cuerda, o las ondas electromagnéticas son ejemplos de las ondas transversales.

En la siguiente figura se indica la asociación entre las compresiones y las expansiones de una onda longitudinal en relación con las crestas y los valles de una onda transversal.



Algunos movimientos ondulatorios, como las olas marinas y las ondas sísmicas son combinaciones de ondas longitudinales y transversales. Por ejemplo, cuando una onda marina viaja sobre la superficie del agua, las moléculas de agua se mueven en trayectorias casi circulares, dibujando una serie de crestas y valles. Cuando la onda pasa, las moléculas de agua en las crestas se mueven en la dirección de la onda y las moléculas en los valles se mueven en dirección contraria. Por lo tanto, no hay desplazamientos de las moléculas de agua después de pasar cierto número de ondas completas.

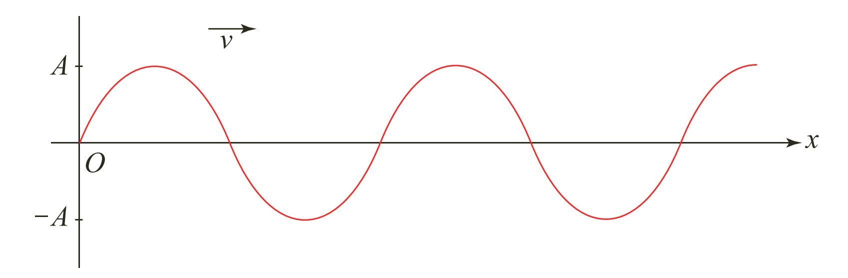
1.4 Función de onda

Hasta el momento se han analizado muchas características de las ondas, como la rapidez, el período, la frecuencia y la longitud de onda, pero es necesario hacer una descripción más detallada de las posiciones y movimientos de las partículas. Para ello realizaremos un análisis matemático de las mismas por medio de una función denominada función de onda.

Definición

La función de onda es una expresión que permite obtener la posición (y) de una partícula del medio con respecto a su posición de equilibrio (x), para cualquier instante de tiempo (t), es decir, $y = f(x, t)$.

La siguiente figura representa una cuerda larga y tensa, en la dirección del eje *Ox*, por medio de la cual se propaga una onda.



Cada partícula de la cuerda oscila con un MAS de la misma amplitud y frecuencia, pero las oscilaciones de las partículas en diferentes puntos no se coordinan entre sí.

El desplazamiento de una partícula en el extremo izquierdo de la cuerda ($x = 0$), donde se origina la onda, está dado por la expresión:

$$y = A \cdot \text{sen}\ \omega \cdot t$$

como, $\omega = \frac{2\pi}{T}$, al remplazar tenemos que:

$$y = A \cdot \text{sen}\left(\frac{2\pi}{T}\right) \cdot t$$

donde A es la amplitud del MAS. Como la onda se ha propagado con velocidad v, el tiempo transcurrido empleado en este recorrido es x/v. Así, el movimiento del punto x en un instante t es el mismo que el movimiento del punto $x = 0$ en el instante anterior $t - x/v$. En consecuencia, el desplazamiento del punto x en el instante t es:

$$y = A \cdot \text{sen}\left[\left(\frac{2\pi}{T}\right)\left(t - \frac{x}{v}\right)\right]$$

Esta ecuación puede expresarse así:

$$y = A \cdot \text{sen}\left[2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{v \cdot T}\right)\right]$$

como $vT = \lambda$, tenemos:

$$y = A \cdot \text{sen}\left[2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)\right]$$

o bien:

$$y = A \cdot \text{sen}\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t - \frac{2\pi}{\lambda} \cdot x\right)$$

En esta expresión podemos interpretar las cantidades $\frac{2\pi}{T}$ y $\frac{2\pi}{\lambda}$, en efecto:

- $\frac{2\pi}{T} = \omega$, es decir, es la frecuencia angular del MAS de cada punto.
- $\frac{2\pi}{\lambda} = \kappa$, denominado número de onda o constante de propagación.

Por lo tanto, la función de onda se expresa como:

$$y = A \cdot \text{sen}\,(\omega \cdot t - \kappa \cdot x)$$

Siempre que la onda viaje de izquierda a derecha, la función de onda se expresa con signo negativo. Cuando la onda se propaga de derecha a izquierda, la función de onda se expresa como:

$$y = A \cdot \text{sen}\,(\omega \cdot t + \kappa \cdot x)$$

Al valor del ángulo $\omega \cdot t \pm \kappa \cdot x$ se le denomina ángulo de fase.

Estas expresiones para la función de onda describen cómo se propaga una perturbación. El análisis de su significado físico nos revela una doble periodicidad. Así, la cantidad T de la fase indica que, para un valor de x dado, los valores de la función se repiten con periodicidad temporal T.

Por otra parte, el primer término del ángulo de fase nos indica que, para un tiempo t dado, los valores de la función también se repiten con periodicidad espacial λ.

EJEMPLO

Una cuerda tensa y atada en uno de sus extremos a la pared vibra con un movimiento armónico simple de amplitud 2 cm, frecuencia 8 Hz y una velocidad 20 m/s. Determinar:

a. La frecuencia angular, la amplitud, el período, la longitud y el número de onda.

b. La función de onda para un instante de tiempo $t = 0{,}05$ s.

Solución:

a. La amplitud A de la onda es la del movimiento del extremo de la cuerda, es decir, $A = 2$ cm.

La frecuencia angular es:

$$\omega = 2\pi \cdot f = (2\pi \text{ rad/ciclo})(8 \text{ Hz}) = 50{,}26 \text{ rad/s}$$

El período es $$T = \frac{1}{f} = 0{,}125 \text{ s.}$$

La longitud de onda se obtiene así: $v = \lambda \cdot f$

$$\frac{v}{f} = \lambda$$ *Al despejar λ*

$$\lambda = \frac{2.000 \text{ cm/s}}{8 \text{ Hz}} = 250 \text{ cm}$$ *Al remplazar y calcular*

El número de onda se obtiene mediante la expresión:

$$\kappa = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{250 \text{ cm}} = 0{,}025 \text{ rad/cm}$$ *Al remplazar y calcular*

b. Para hallar la función de onda en el $t = 0{,}05$ s, se utiliza la función de onda:

$$y = A \cdot \text{sen}(\omega \cdot t - \kappa \cdot x) = (2 \text{ cm}) \cdot \text{sen}[(50{,}26 \text{ rad/s})\, t - (0{,}025 \text{ rad/cm}) \cdot x]$$

Al remplazar $t = 0{,}05$ s se tiene que:

$$y = (2 \text{ cm}) \cdot \text{sen}[(50{,}26 \text{ rad/s})(0{,}05 \text{ s}) - (0{,}025 \text{ rad/cm}) \cdot x]$$

Así, la función de onda es $y = (2 \text{ cm}) \cdot \text{sen}[(2{,}513 \text{ rad}) - (0{,}025 \text{ rad/cm}) \cdot x]$

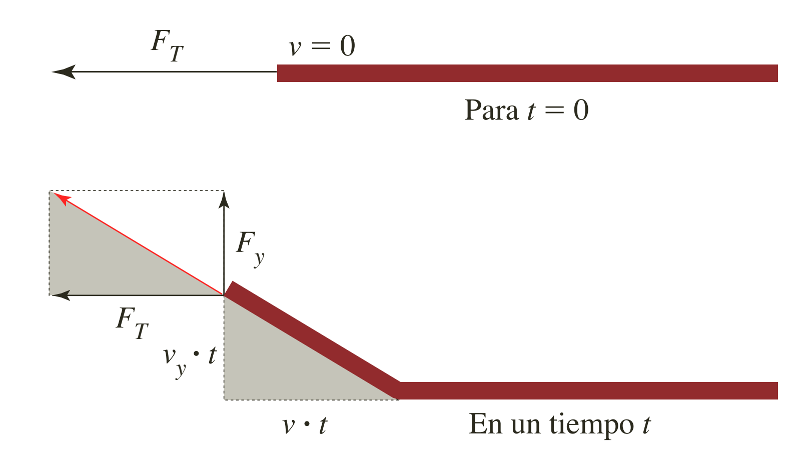
1.5 Velocidad de una onda transversal

Alguna vez habrás observado que, en el proceso de afinación de una guitarra se hace girar la clavija para aumentar o disminuir la tensión en la cuerda. Si la tensión aumenta, todo pulso generado en ella tendrá una mayor velocidad de propagación.

Pero, como no todas la cuerdas tienen el mismo grosor, dicha velocidad también dependerá de este factor, ya que entre mayor sea el grosor de la cuerda, menor será la velocidad de propagación. Por lo tanto, se puede afirmar que la velocidad de propagación de una onda en una cuerda es:

- Directamente proporcional a la tensión de la misma.
- Inversamente proporcional al grosor de la cuerda.

Para determinar los factores de los cuales depende la velocidad de propagación de las ondas en una cuerda, supongamos que una cuerda es sometida a una tensión F_T y que en un instante de tiempo $t = 0$ se produce, en su extremo, una fuerza en dirección vertical F_y con el fin de hacerla oscilar, tal como se muestra en la siguiente figura.



Para una sección corta de cuerda, de masa m, en el instante $t = 0$, la velocidad en dirección vertical es cero. En la figura se observa que las partículas de la cuerda se mueven hacia arriba con velocidad constante v_y hasta el instante t, es decir que el impulso de la fuerza F_T es $F_y \cdot t$.

Según la segunda ley de Newton, tenemos que:

$$F_y = m \cdot \frac{\Delta v_y}{\Delta t}$$

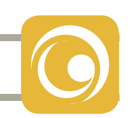
Pero dado que $\Delta t = t - 0 = t$ y que $\Delta v_y = v_y - 0 = v_y$, entonces:

$$F_y \cdot t = m \cdot v_y$$

que corresponde a la cantidad de movimiento total en el instante t, la cual aumenta proporcionalmente con el tiempo.

Como las partículas de la cuerda, una vez empiezan su movimiento lo hacen con velocidad constante v_y, la distancia que recorren en el tiempo t es $v_y \cdot t$.

Si la velocidad con la cual se propaga la onda es v, en el mismo tiempo en que el extremo de la cuerda recorre una distancia vertical $v_y \cdot t$, la onda recorre una distancia horizontal $v \cdot t$.



En la figura se observan dos triángulos rectángulos semejantes sombreados en su interior; en el primero sus catetos son $v_y t$ y vt, y en el segundo son F_y y F_T. Por tanto:

$$\frac{F_y}{F_T} = \frac{v_y \cdot t}{v \cdot t}$$

De donde: $v \cdot F_y \cdot t = F_T \cdot v_y \cdot t$

Como $F_y \cdot t = m \cdot v_y$, entonces al remplazar tenemos que:

$$v \cdot m \cdot v_y = F_T \cdot v_y \cdot t$$

Al simplificar v_y se obtiene la expresión: $v \cdot m = F_T \cdot t$

Si entre el intervalo $t = 0$ y t, el pulso se propaga una distancia l con velocidad v, $t = \frac{l}{v}$, entonces:

$$v \cdot m = F_T \cdot \frac{l}{v}$$

Lo cual se puede expresar como: $v^2 = F_T \cdot \frac{l}{m}$, o, $v^2 = \frac{F_T}{m/l}$

La masa de las partículas en movimiento de la cuerda es la masa por unidad de longitud (m/l) o densidad lineal (μ). Luego v es:

$$v^2 = \frac{F_T}{\mu}$$

Igual a:

$$v = \sqrt{\frac{F_T}{\mu}}$$

EJERCICIO

Una cuerda de densidad lineal 0,001 kg/m está sometida a una tensión de 100 N. Calcula la velocidad de propagación de la onda.

EJEMPLOS

1. **Una cuerda de un arpa sinfónica de 2 m de longitud se somete a una tensión de 500 N. Si su masa es de 60 g, calcular:**
   a. La densidad lineal de la cuerda.
   b. La velocidad de una onda en dicha cuerda.

Solución:

a. La densidad lineal está dada por la expresión:

$$\mu = \frac{m}{l}$$

$$\mu = \frac{0{,}06 \text{ kg}}{2 \text{ m}} = 0{,}03 \text{ kg/m}$$ *Al remplazar y calcular*

b. Para calcular el valor de la velocidad de propagación en la cuerda se utiliza la ecuación:

$$v = \sqrt{\frac{F_T}{\mu}}$$

$$v = \sqrt{\frac{500 \text{ N}}{0{,}03 \text{ kg/m}}} = 129{,}1 \text{ m/s}$$ *Al remplazar y calcular*

La velocidad de propagación de la onda en la cuerda es 129,1 m/s

2. **La densidad de masa lineal de una cuerda es de 0,25 kg/m. ¿Qué tensión deberá aplicarse para producir una velocidad de onda de 20 m/s?**

Solución:

Para calcular el valor de la tensión que se debe despejar F_T de la ecuación de velocidad:

$$F_T = \mu v^2 = (0{,}25 \text{ kg/m})(20 \text{ m/s})^2 = 100 \text{ N}$$ *Al remplazar y calcular*

La tensión que se debe aplicar para producir una velocidad de onda de 20 m/s es 100 N.

1.6 La energía y la potencia que transmiten las ondas

Todo movimiento ondulatorio tiene energía asociada, por ejemplo, la energía recibida del Sol o los efectos destructivos del oleaje. Para producir un movimiento ondulatorio es necesario aplicar una fuerza a un sector del medio, efectuando así un trabajo sobre el sistema. Al propagarse la onda, cada partícula del medio ejerce fuerza sobre las otras y por ende, trabajo en todo el sistema. De esta manera, se puede transportar energía de una región a otra.

En todos los casos en los que se produce una onda armónica nos encontramos con partículas, de mayor o menor tamaño, que están vibrando. Es decir, en ningún caso hay desplazamiento de materia desde el foco hacia los puntos materiales. En esta propagación, punto a punto, la cantidad de movimiento y la energía se propagan. Por ejemplo, considera la espira de un resorte que vibra con movimiento armónico simple; la energía potencial asociada en el punto de su máxima elongación A es:

$$E_p = \frac{1}{2} \cdot k \cdot A^2$$

Si la espira es el foco, la energía se transmitirá de espira a espira, por lo tanto:

$$E = \frac{1}{2} \cdot k \cdot A^2$$

Como $k = m \cdot \omega v^2$, tenemos que:

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \omega^2 \cdot A^2$$

Siendo $\omega = \frac{2\pi}{T}$, por tanto:

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cdot A^2 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \left(\frac{4\pi^2}{T^2}\right) \cdot A^2$$

Es decir:

$$E = 2\pi^2 \cdot m \cdot \left(\frac{1}{T}\right)^2 \cdot A^2$$

$$E = 2\pi^2 \cdot m \cdot f^2 \cdot A^2$$

Al difundirse la energía por el medio, queda almacenada en cada partícula en forma de una combinación de energía cinética de movimiento y energía potencial de deformación. La energía es absorbida por rozamiento interno y efectos viscosos, transformándose en calor.

Para una onda unidimensional y considerando un medio homogéneo, de densidad lineal μ, la ecuación de energía se transforma así:

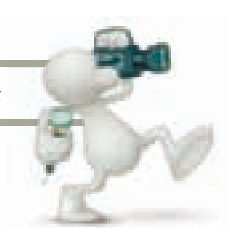
$$E = 2\pi^2 \cdot \mu \cdot l \cdot f^2 \cdot A^2$$

Si se considera un punto de dimensiones muy pequeñas, Δl, y masa, Δm, la densidad lineal será $\mu = \frac{\Delta m}{\Delta l}$, por tanto:

$$E = 2\pi^2 \cdot \mu \cdot \Delta l \cdot f^2 \cdot A^2$$

Como Δl corresponde a la distancia lineal Δx, podemos escribir $\Delta l = v \cdot \Delta t$, es decir:

$$E = 2\pi^2 \cdot \mu \cdot v \cdot f^2 \cdot A^2 \cdot \Delta t$$



Ahora, teniendo en cuenta que $P = \frac{E}{\Delta t}$, podemos calcular la potencia transmitida:

$$P = \frac{E}{\Delta t} = 2\pi^2 \cdot \mu \cdot v \cdot f^2 \cdot A^2$$

EJEMPLO

En el extremo de una cuerda tensa muy larga, de masa 0,04 kg y densidad lineal 0,08 kg/m, se produce un MAS, perpendicular a la dirección de la cuerda, de amplitud 0,02 m y frecuencia 8 Hz. Si esta perturbación se propaga a lo largo de la cuerda con velocidad 20 m/s, determinar:

a. La amplitud, la frecuencia y la longitud de onda de las ondas generadas.
b. La energía que transmiten estas ondas.
c. La potencia que transmiten las ondas producidas a lo largo de la cuerda.

Solución:

a. Teniendo en cuenta el enunciado, se pueden determinar los valores de la amplitud y de la frecuencia, así:

$A = 0{,}02$ m $\qquad f = 8$ Hz

La longitud de onda se calcula por medio de la ecuación de velocidad de propagación así:

$$v = \lambda \cdot f$$

$$\frac{v}{f} = \lambda \qquad \textit{Al despejar } \lambda$$

$$\lambda = \frac{20 \text{ m/s}}{8 \text{ Hz}} = 2{,}5 \text{ m} \qquad \textit{Al remplazar y calcular}$$

b. La energía transmitida se calcula por medio de la ecuación de energía:

$$E = 2\pi^2 \cdot m \cdot f^2 \cdot A^2 = 2\pi^2 \cdot (0{,}04 \text{ kg}) \cdot (8 \text{ Hz})^2 \cdot (0{,}02 \text{ m})^2 = 0{,}02 \text{ J} \qquad \textit{Al calcular}$$

La energía transmitida por las ondas en la cuerda es 0,02 J.

c. La potencia transmitida se calcula por medio de la ecuación:

$$P = 2\pi^2 \cdot \mu \cdot v \cdot f^2 \cdot A^2$$

Al remplazar tenemos:

$$P = 2\pi^2 \cdot (0{,}08 \text{ kg/m}) \cdot (20 \text{ m/s}) \cdot (8 \text{ Hz})^2 \cdot (0{,}02 \text{ m})^2 = 0{,}8 \text{ W}$$

La potencia transmitida por las ondas en la cuerda es 0,8 W.

1.7 Las ondas sísmicas

Las ondas sísmicas son la propagación de perturbaciones temporales generadas por pequeños movimientos en un medio. Estas ondas que se originan en el interior de la corteza terrestre, debido a repentinos desplazamientos en fallas o hendiduras en la tierra, se propagan hacia la superficie terrestre originando terremotos o movimientos sísmicos de baja intensidad. Lo cual nos indica que dichas perturbaciones generan energía que es difundida hacia fuera en forma de ondas sísmicas.

La velocidad de las ondas depende, como ocurre en todas las manifestaciones ondulatorias, de las propiedades del medio; fundamentalmente de la elasticidad y densidad de los materiales por los cuales se propaga.

En el interior de la corteza terrestre se producen dos tipos de ondas sísmicas que viajan a través de la tierra, y que son conocidas como ondas de cuerpo u ondas internas, las cuales pueden ser compresionales (ondas *P*) o de corte (ondas *S*).

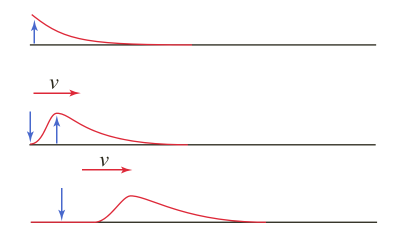
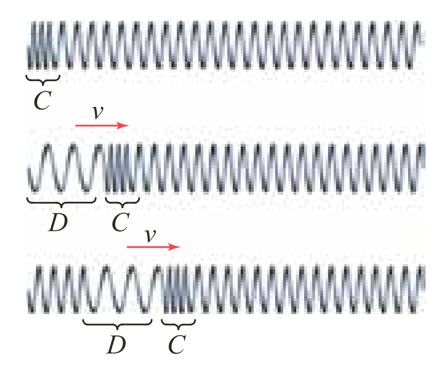


Figura 4. Onda secundaria, en la que las partículas se mueven perpendicularmente a la dirección de propagación de la onda.

- *Las ondas P, o primarias*, son ondas que se transmiten cuando las partículas del medio se desplazan en la dirección de propagación, produciendo compresiones y dilataciones en el medio. Por ejemplo, si se comprime un extremo del resorte y luego se suelta, el material comprimido se extiende, comprimiendo las partículas que se encuentran a su alrededor, tal como se muestra en la siguiente figura (*C* indica la compresión y *D* la dilatación):



Este tipo de onda es la más veloz de todas las ondas sísmicas (alcanza más de 11 km/s en el interior de la Tierra) y, por lo tanto, es la primera en llegar a cualquier punto, en ser sentida y en ser registrada en los sismogramas.

- *Las ondas S, o secundarias*, son ondas en las cuales las partículas del medio se desplazan perpendicularmente a la dirección de propagación, por ello están asociadas con deformaciones del terreno.

Las ondas que viajan por una cuerda, producidas por el movimiento de uno de sus extremos perpendicularmente a ella, como se muestra en la figura 4, es un ejemplo de este tipo de ondas.

En la figura 5 se puede observar el sismograma del arribo de una onda *P*, denotada como P_g, seguida por la onda *S* (S_g) en un punto muy cercano al epicentro (foco que irradia ondas sísmicas superficiales) del movimiento telúrico.

Además de las ondas que viajan a través del terreno, existen otras que lo hacen por la superficie terrestre. Estas ondas también se dividen en dos categorías: las ondas de Rayleigh y las ondas de Love.

- *Las ondas de Rayleigh* se originan por la interacción entre las ondas *P* y la componente vertical de las ondas *S*. Son las ondas más lentas, con velocidades que van de 1 a 4 km/s. Estas ondas hacen emerger algunas zonas de la superficie terrestre y hundir a otras.
- *Las ondas de Love* se comportan de manera muy parecida a las ondas de Rayleigh, pero se originan por la interferencia constructiva de la componente horizontal de las ondas *S*. Aunque más lentas que las ondas internas, las ondas de Love tienen velocidades de 1 a 4,5 km/s, siendo más veloces que las de Rayleigh. Estas ondas provocan cortes en la superficie terrestre.

La energía asociada a las ondas sísmicas depende de la amplitud de las ondas. Cuando la onda avanza, se amortigua y su amplitud disminuye. Así, el movimiento sísmico es menor cuando el hipocentro (centro en el cual se produce la onda sísmica) se encuentra a mayor profundidad. El aparato usado para la detección de ondas sísmicas se llama *sismógrafo*.

Las ondas sísmicas también son utilizadas en la explotación del petróleo y de otros combustibles.

←1 min→

Figura 5. La onda primaria alcanza velocidades de más de 11 km/s por lo que es la primera onda sísmica en ser registrada por el sismógrafo, luego arriba la onda secundaria.

2. Fenómenos ondulatorios

2.1 Reflexión de las ondas

Hasta el momento hemos estudiado las ondas como si el medio fuese de extensión infinita y homogénea. Pero ¿qué sucede cuando una onda choca contra un obstáculo?

Cuando una onda llega a un obstáculo o al final del medio material donde se propaga, una parte de la onda se devuelve, es decir, se refleja. Este cambio de dirección que experimenta la onda depende de la diferencia de elasticidad de los medios. Por ejemplo, al arrojar un objeto pequeño a la superficie del agua de un estanque, se generan frentes de ondas circulares, cuando las ondas generadas chocan contra las paredes del estanque experimentan un cambio de dirección con la misma amplitud, lo cual indica que la onda se reflejó y no hubo transmisión.

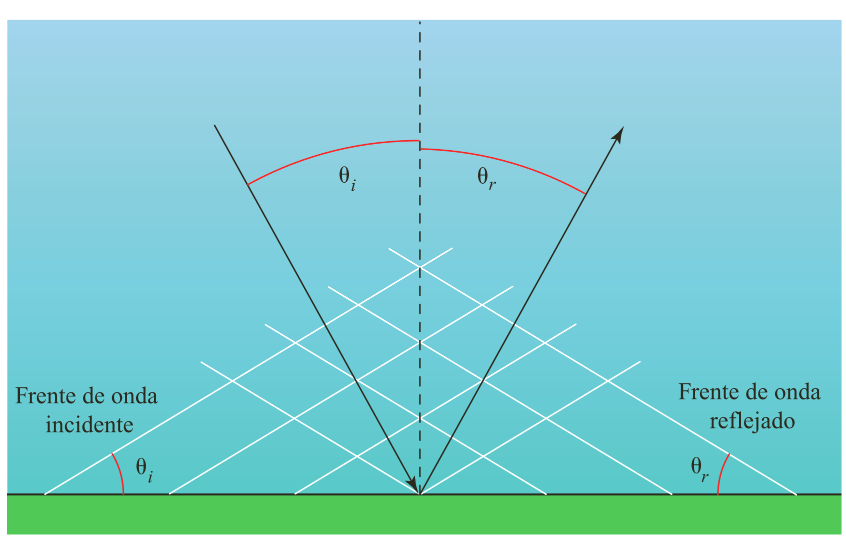
A este fenómeno de las ondas se le denomina *reflexión*.

Definición

La reflexión consiste en el cambio de dirección que experimenta una onda cuando choca contra un obstáculo. La onda que se dirige hacia el obstáculo se denomina onda incidente, mientras que la onda que se aleja del obstáculo después de haber chocado contra él se denomina onda reflejada.

Si la densidad del segundo medio es mayor que la del primero, la onda reflejada sufre un desfase de 180°. Es decir que si la onda incidente al chocar estaba en cresta, se devuelve en valle o viceversa. Si la densidad del segundo medio es menor que la del primero, la onda reflejada se devuelve sin desfase.

En la siguiente figura se representa lo que ocurre con la dirección de un frente de onda cuando se encuentra con un obstáculo.



Como se observa en la figura, el ángulo que la onda incidente forma con la superficie reflectora es igual al ángulo formado por la onda reflejada, es decir, *el ángulo de reflexión* es igual *al ángulo de incidencia*. Por tanto, podemos decir que:

$$\theta_i = \theta_r$$

EJERCICIO

¿Una cuerda tendrá mayor velocidad si su densidad disminuye? Explica.

El ángulo de incidencia, θ_i, se define como el ángulo formado por la onda incidente con la perpendicular a la superficie reflectora; el ángulo de reflexión, θ_r, es el que corresponde a la onda reflejada.

2.2 Refracción de las ondas

Cuando una onda llega a la frontera con otro medio diferente al medio en que se propaga, una parte de ella se refleja mientras que otra parte se transmite. La parte de la onda que es transmitida hacia el otro medio se llama *onda refractada*.

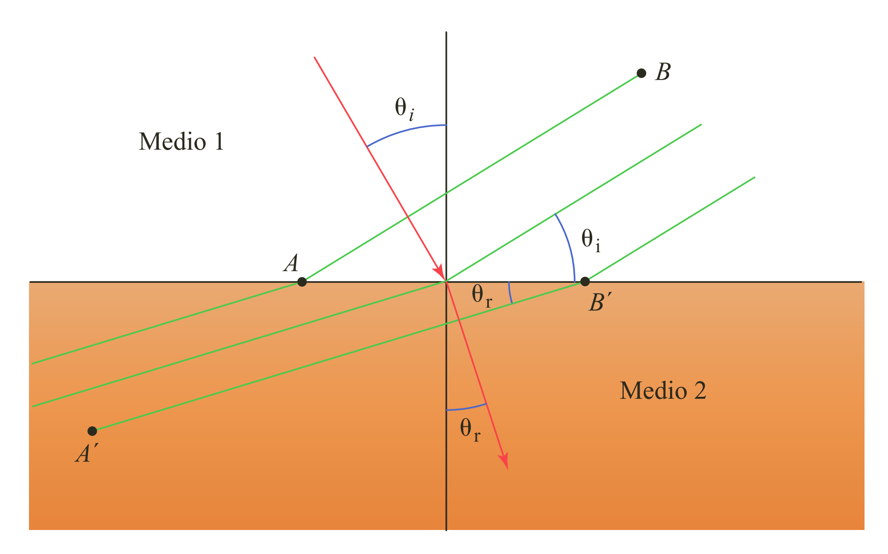
Cuando una onda cambia de medio, la dirección y la velocidad de propagación también cambian; a este fenómeno se le denomina *refracción*.

Si se genera un pulso plano que viaje de una región más profunda a una región menos profunda, en un estanque con agua, la velocidad de propagación de la onda disminuirá a medida que la profundidad sea menor. En el instante en que la onda cruza la frontera, se produce una diferencia en la longitud de onda que ocasiona una desviación en la dirección de propagación. Sin embargo, la frecuencia en los dos medios no cambia, pues esta depende de la perturbación inicial; por lo tanto, para disminuir la velocidad de propagación es necesario disminuir la longitud de onda.

Definición

La refracción de las ondas consiste en el cambio de dirección que experimenta un movimiento ondulatorio cuando pasa de un medio material a otro.

En la siguiente figura se representa la desviación de la dirección de una onda cuando cruza de un medio material a otro.



En la figura se observa que la velocidad de la onda en el medio 2 es menor que la velocidad en el medio 1, de tal modo que la dirección de la onda se mueve hacia la normal a la superficie de separación de los medios materiales, siendo el ángulo de refracción, θ_r, menor que el ángulo de incidencia, θ_i.

En la figura, el frente de onda plano *AB* viaja por el medio 1 con velocidad v_1 y forma con la superficie de separación de los dos medios un ángulo θ_i. Al propagarse por el medio 2 con velocidad v_2, el frente de onda *A'B'* forma con la superficie de separación un ángulo θ_r.



Willebrord Snell van Royen. También conocido como Snellius, es un astrónomo y matemático holandés, que enunció la ley de refracción de la luz en 1621.

Según la figura 6, las ondas se propagan con mayor velocidad en el medio 1. Observa que mientras la onda recorre una distancia $v_1 \cdot t$ desde el punto *B* hasta el punto *B'* en el medio 1, en el medio 2 la onda recorre una distancia $v^2 \cdot t$ desde *A* hasta *A'*. Puesto que los triángulos *ABB'* y *AA'B'* son rectángulos, podemos escribir que:

$$\text{sen } \theta_i = \frac{v_1 \cdot t}{AB'} \quad \text{y} \quad \text{sen } \theta_r = \frac{v_2 \cdot t}{AB'}$$

por tanto, la relación entre los senos de los ángulos es:

$$\frac{\text{sen } \theta_i}{\text{sen } \theta_r} = \frac{\dfrac{v_1 \cdot t}{AB'}}{\dfrac{v_2 \cdot t}{AB'}}$$

Al simplificar *AB'* tenemos que:

$$\frac{\text{sen } \theta_i}{\text{sen } \theta_r} = \frac{v_1 \cdot t}{v_2 \cdot t}$$

Por tanto, al simplificar *t*:

$$\frac{\text{sen } \theta_i}{\text{sen } \theta_r} = \frac{v_1}{v_2}$$

Esta relación matemática que describe el cambio de dirección que experimenta una onda refractada se denomina *Ley de Snell*.

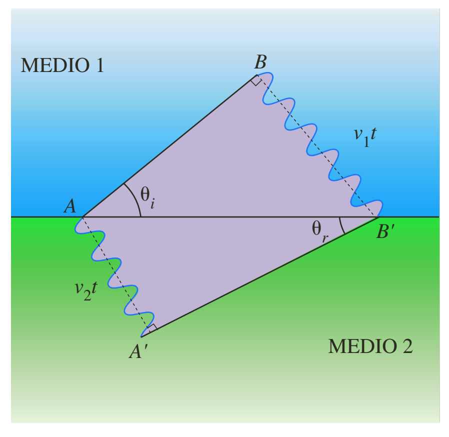


Figura 6. La velocidad de la onda aumenta al cambiar del medio 1 al medio 2.

EJEMPLOS

1. Las ondas sísmicas se refractan dentro de la tierra al viajar entre rocas de distintas densidades y por lo tanto su velocidad cambia, al igual que su dirección de propagación. Una onda sísmica *P* viaja a 8 km/h y choca con el límite entre dos tipos de material. Si llega a esta frontera con ángulo de incidencia de 50° y se aleja con un ángulo de 31°, ¿cuál será la velocidad en el segundo medio?

Solución:

Para hallar la velocidad en el segundo medio recurrimos a la ley de Snell:

$$\frac{\text{sen } \theta_i}{\text{sen } \theta_r} = \frac{v_1}{v_2}$$

$$\frac{\text{sen } 50°}{\text{sen } 31°} = \frac{8 \text{ km/h}}{v_2} \qquad \textit{Al remplazar}$$

$$v_2 = \frac{8 \text{ km} \cdot \text{sen } 31°}{\text{sen } 50°} \qquad \textit{Al despejar } v_2$$

$v_2 = 5{,}38$ km/h *Al calcular*

La velocidad de la onda sísmica en el medio 2 es 5,38 km/h.

2. Una onda sísmica *P* pasa por una frontera entre rocas, donde su velocidad varía de 6 km/s a 7,5 km/s. Si llega a la frontera formando un ángulo de 45° con ella, ¿cuál es el ángulo de refracción?

Solución:

Como sen 45° = 0,7, al despejar el θ_r de la ley de Snell tenemos:

$$\text{sen } \theta_r = \frac{v_2}{v_1} \text{sen } \theta_i$$

$$\text{sen } \theta_r = \frac{(7{,}5 \text{ km/s})}{(6 \text{ km/s})}(0{,}7) = 0{,}875 \qquad \textit{Al remplazar}$$

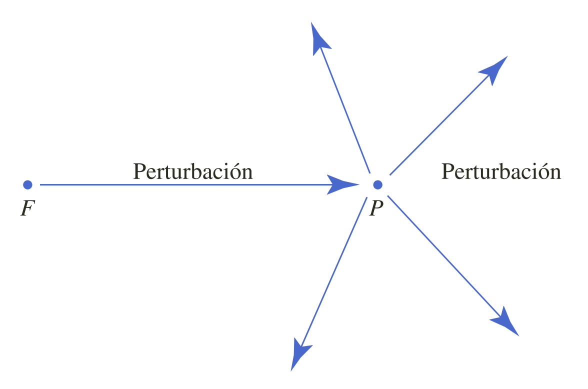
Y por consiguiente $\theta_r = 61°$



Christian Huygens. Realizó una construcción geométrica para explicar la forma de propagación de las ondas.

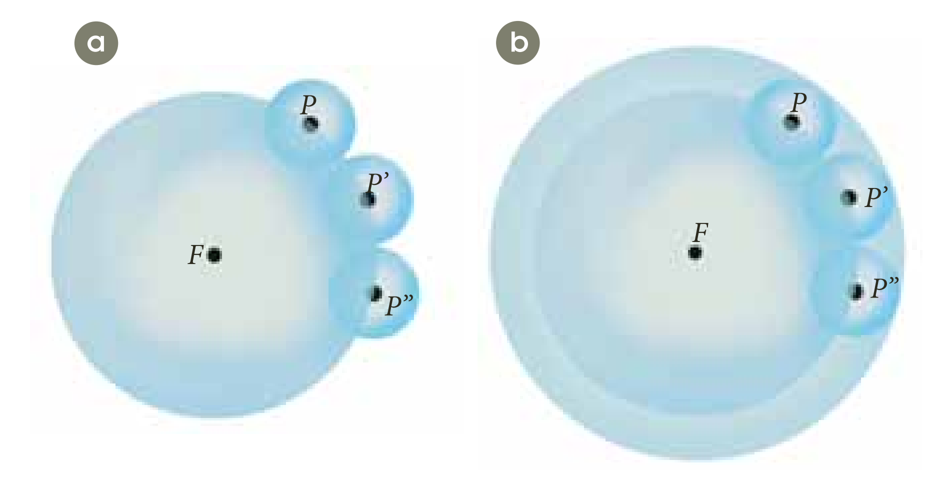
2.3 Principio de Huygens

El principio de Huygens, establecido por el científico holandés Christian Huygens en 1678, es una construcción geométrica que explica cómo cambia un frente de onda de una posición a otra y su forma de propagación. Huygens admitió que cada punto del medio alcanzado por la perturbación, se convierte en un foco secundario que se expande en todas las direcciones con rapidez igual a la rapidez de propagación de la onda, tal como se muestra en la siguiente figura.



En efecto, en el caso de las ondas armónicas propagándose con la misma rapidez en todas las direcciones en un medio material homogéneo, si el punto *P* es alcanzado por la vibración, se convertirá en un oscilador armónico con MAS de las mismas características que las del foco y, además, propagará esta vibración a los puntos de su entorno. Por lo cual, *P* emite ondas secundarias de la misma naturaleza que las que llegan a él.

En la siguiente figura se observa que si cada punto, *P*, *P'*, *P''*…, emite sus propias ondas, representadas por sus respectivos frentes esféricos (*a*), el frente de onda resultante, en un instante dado, es la tangente común externa (envolvente) a los frentes de onda de las ondas secundarias (*b*).



En este caso, el frente de onda estará representado en las sucesivas posiciones por las superficies esféricas concéntricas dibujadas. Es decir:

Definición

Todo punto de un frente de onda se considera como un foco o fuente de nuevas ondas que se propagan en todas las direcciones, con velocidad igual a la velocidad de propagación de las ondas.



2.4 Difracción

Las ondas se dispersan al propagarse, y cuando encuentran un obstáculo, lo rodean y se doblan alrededor de él. Por ejemplo, cuando estamos en un cuarto cerrado y deseamos escuchar una conversación que se da en el pasillo, abrimos ligeramente la puerta y así logramos escuchar a través de la rendija. Esto sucede porque la onda sonora bordea el obstáculo, o sea la puerta, y sigue su camino, es decir que entra a la habitación. A este fenómeno se le llama difracción.

Definición

La difracción de las ondas consiste en la dispersión y curvado aparente de las ondas cuando encuentran un obstáculo.

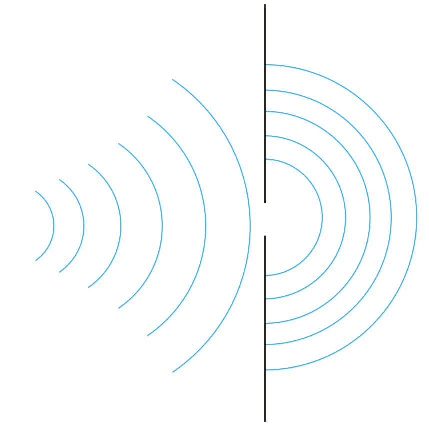
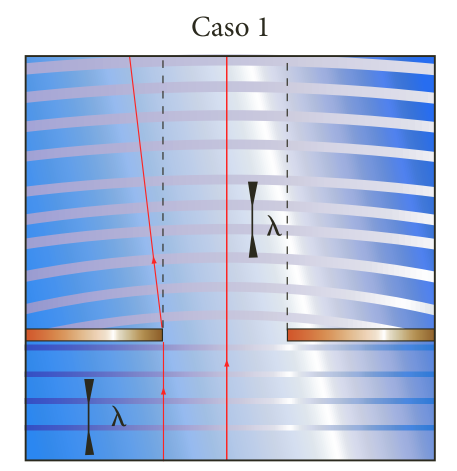


Figura 7. Frentes de onda circulares generados por la difracción del frente de onda al pasar por la abertura.

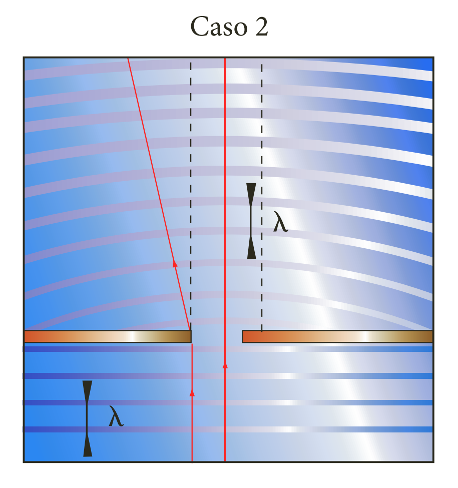
En la figura 7 se aprecia un caso de difracción de ondas, en el cual, un frente de onda llega a una abertura y al pasar genera frentes de onda circulares. El principio de Huygens nos proporciona una explicación geométrica de este comportamiento, admitiendo que la abertura es un foco secundario, donde las ondas que pasan al otro lado son producidas por dicho foco.

En la siguiente figura se observan tres casos de difracción, en los cuales la longitud de onda (λ) es la misma, pero el ancho de la abertura es diferente.

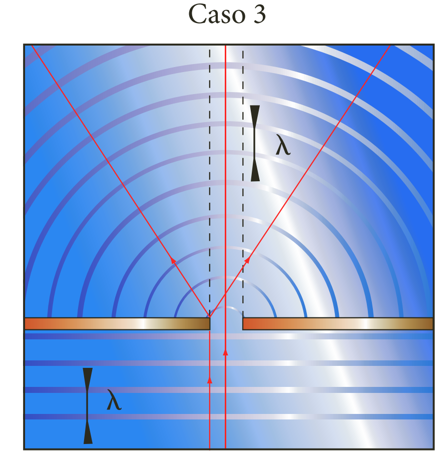
Caso 1



Caso 2



Caso 3



En el caso 1, cuando el ancho de la abertura es mayor comparado con la longitud de onda (λ), se observa una ligera deformación en los frentes de onda luego de cruzar por la abertura. Cuando los frentes se encuentran relativamente lejos de la abertura se observan planos. Las líneas rectas perpendiculares a los frentes de onda ayudan a dimensionar la deformación al observar el ángulo entre ellas.

En el caso 2, cerca de los bordes cada frente de onda se ve ligeramente deformado, tomando una forma más circular; el ángulo entre las perpendiculares de los frentes de onda es mayor que en el caso 1.

En el caso 3, cuando se reduce el tamaño de la abertura, siendo su longitud igual a la longitud de onda (λ), los frentes de ondas son aún más circulares que en los casos anteriores.

La difracción de las ondas se observa con mayor claridad cuando el tamaño de la abertura es menor que la longitud de onda. Si la longitud de onda es mucho menor que las dimensiones de la abertura, prácticamente no es reconocible el efecto de difracción.

2.5 Principio de superposición

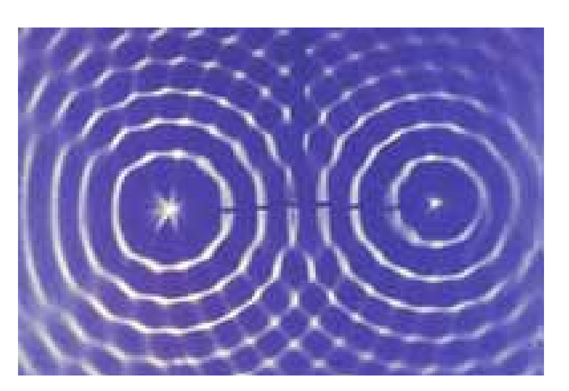
Hemos analizado lo que sucede cuando una onda se encuentra con obstáculos u otros medios diferentes. Ahora analizaremos el comportamiento de una onda cuando se encuentra con otra en un mismo punto del medio. Cada onda afecta al medio en forma independiente, y por tanto los efectos de tales ondas pueden analizarse mediante el principio de superposición.

Definición

El principio de superposición establece que cuando dos o más ondas se encuentran en determinado punto de un medio en el mismo instante, el desplazamiento resultante es la suma algebraica de los desplazamientos individuales.

2.5.1 Interferencia

Cuando dos o más ondas de la misma naturaleza coinciden en un punto del medio, en un instante determinado, sucede lo que se define como interferencia. Por ejemplo, si se golpea periódicamente con dos objetos la superficie del agua en un estanque, se producen dos frentes de onda circulares que se propagan a través de ella con la misma frecuencia e igual amplitud, es decir, en el momento en que un objeto produce una cresta, el otro también genera la suya, y cuando uno produce un valle, el otro también lo hace. En estas condiciones, los dos focos vibratorios se encuentran en fase, originando una superposición de las ondas, como se muestra en la siguiente figura.



EJERCICIO

Escribe las diferencias entre interferencia y difracción.

Si en el mismo instante, en determinado punto de la superficie se encuentran dos crestas o dos valles, la amplitud del pulso resultante es la suma de las amplitudes, siendo la interferencia constructiva o positiva. Por otra parte, si se encuentran un valle y una cresta con igual amplitud, la superficie aparenta no vibrar, siendo esta una interferencia destructiva o negativa.

En una interferencia destructiva o negativa, para que los movimientos al superponerse anulen la vibración, sus estados vibratorios deben estar en oposición de fase, lo cual solo ocurrirá si las ondas llegan habiendo recorrido distancias diferentes, d_1 y d_2, es decir, que la diferencia de distancias $d_1 - d_2$ difieran en un número entero de medias longitudes de onda $\left(\frac{\lambda}{2}, \frac{3\lambda}{2}, \frac{5\lambda}{2}, \ldots\right)$ Por tanto:

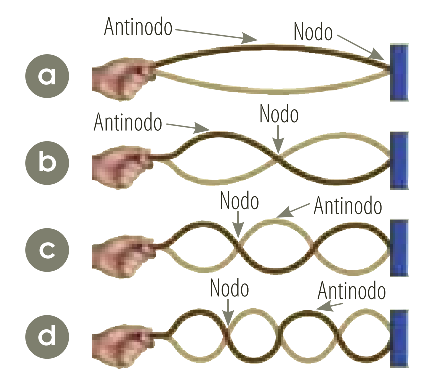
$$d_1 - d_2 = (2n + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}$$

donde $2n + 1$ es siempre un número impar. En una interferencia constructiva o positiva, como las ondas llegan en fase al mismo punto, la diferencia de distancias $d_1 - d_2$ difieren en un número entero de longitudes de onda $(0, \lambda, 2\lambda, 3\lambda, \ldots)$, es decir: $d_1 - d_2 = n \cdot \lambda$ siendo n un número natural.

2.5.2 Ondas estacionarias

Cuando dos ondas armónicas, de igual frecuencia y amplitud, se propagan en el mismo medio, en la misma dirección pero en sentidos opuestos, se superponen, originando una oscilación particular, que no tiene las características de una onda viajera y por eso se define como *onda estacionaria*.

Las ondas estacionarias se pueden transmitir en una cuerda con los extremos fijos. Cuando una onda armónica alcanza un extremo fijo, se refleja, originando una onda que viaja en sentido opuesto. Al superponerse la onda original con la reflejada, se genera la onda estacionaria, como se muestra a continuación.



Los puntos de interferencia destructiva, llamados *nodos*, y de interferencia constructiva, llamados *antinodos*, permanecen en lugares fijos. La frecuencia mínima de vibración que genera una onda estacionaria se muestra en la parte a de la figura. Las ondas de las partes b y c se generan a una doble y triple frecuencia, de la frecuencia mínima, considerando que la tensión de la cuerda permanece constante. La cuerda también puede vibrar con una frecuencia cuatro veces la mínima (d), y así sucesivamente. Estas frecuencias a las que se producen las ondas estacionarias son frecuencias naturales y frecuencias resonantes de la cuerda.

A medida que aumenta la cantidad de nodos de la onda estacionaria, disminuye la longitud de onda. En cada caso:

$$\lambda = \frac{2 \cdot L}{n}$$

Donde L es la longitud de la cuerda y n, el número de armónicos, cada longitud de onda estacionaria implica una distribución de nodos a lo largo de la cuerda. Esta distribución caracteriza la onda estacionaria que representa lo que se llama *modo normal de vibración.*

Como $\lambda \cdot f = v$, la frecuencia en cada caso es:

$$f = \frac{n \cdot v}{2 \cdot L}$$

La frecuencia mínima se denomina *frecuencia fundamental* o *primera armónica* y corresponde a un antinodo. La longitud completa corresponde a media longitud de onda, es decir:

$$L = \frac{1}{2} \cdot \lambda_1$$

Donde λ_1 es la longitud de onda fundamental. El segundo modo, después del fundamental, tiene dos ondas y se llama *segundo armónico* o *primer sobretono*; la longitud de la cuerda corresponde a una longitud completa de la onda, lo cual es igual a:

$$L = \lambda_2$$

Para la tercera y cuarta armónicas, $L = \frac{3}{2}\lambda_3$ y $L = 2\lambda_4$, respectivamente, y así sucesivamente. Podemos entonces escribir:

$$L = \frac{n \cdot \lambda_n}{2} \quad \text{siendo } n = 1, 2, 3, \ldots$$

El entero n indica el número de la armónica correspondiente: $n_1 = 1$ para la primera armónica, $n_2 = 2$ para la segunda armónica, y así sucesivamente.

Hemos visto que sistemas como un péndulo o una masa unida a un resorte tienen una única frecuencia propia de oscilación, determinada por ciertas características del sistema. Si una fuerza exterior perturba el sistema con esta frecuencia, se produce resonancia.

A diferencia de estos sistemas, las cuerdas presentan un número infinito de frecuencias propias: la fundamental y todas las armónicas. En la práctica, cuando se hace vibrar una cuerda, se produce una superposición de ondas de todas estas frecuencias. Cualquier perturbación, por pequeña que sea, que tenga una frecuencia igual a alguna de ellas, hará que la cuerda entre en resonancia.

EJEMPLO

Una cuerda de piano tiene una masa 12 g y una longitud de 1,5 m. Determinar:

a. La longitud de onda y la velocidad de propagación de la primera armónica.

b. La tensión que deberá tener la cuerda si debe vibrar a una frecuencia fundamental de 131 Hz.

c. Las frecuencias de las cuatro primeras armónicas.

Solución:

a. La longitud de onda de la fundamental está dada por la expresión:

$$\lambda = \frac{2 \cdot L}{n}$$

$$\lambda = \frac{2 \cdot 1{,}5 \text{ m}}{1} = 3 \text{ m}$$ *Al remplazar y calcular*

La velocidad de propagación se expresa como:

$$v = \lambda \cdot f$$

$$v = 3 \text{ m} \cdot 131 \text{ Hz} = 393 \text{ m/s}$$ *Al remplazar y calcular*

La longitud de onda y la velocidad de propagación de la fundamental son 3 m y 393 m/s, respectivamente.

b. La tensión que debe tener la cuerda es:

$$F_T = \frac{m}{L} \cdot v^2$$ *Al remplazar*

$$F_T = \frac{0{,}012 \text{ kg}}{1{,}5 \text{ m}} (393 \text{ m/s})^2$$

$$F_T = 1.235{,}6 \times 10^3 \text{ N}$$ *Al calcular*

La tensión de la cuerda debe ser de 1.235,6 N.

c. Las frecuencias de las cuatro primeras armónicas son:

Para la primera armónica la frecuencia es:

$$f = 131 \text{ Hz}$$

Para la segunda armónica la frecuencia es:

$$f = \frac{n \cdot v}{2 \cdot L}$$

$$f = \frac{2 \cdot 393 \text{ m/s}}{2 \cdot 1{,}5 \text{ m}} = 262 \text{ Hz}$$ *Al remplazar y calcular*

Para la tercera armónica la frecuencia es:

$$f = \frac{n \cdot v}{2 \cdot L}$$

$$f = \frac{3 \cdot 393 \text{ m/s}}{2 \cdot 1{,}5 \text{ m}} = 393 \text{ Hz}$$ *Al remplazar y calcular*

Para la cuarta armónica la frecuencia es:

$$f = \frac{n \cdot v}{2 \cdot L}$$

$$f = \frac{4 \cdot 393 \text{ m/s}}{2 \cdot 1{,}5 \text{ m}} = 524 \text{ Hz}$$ *Al remplazar y calcular*

Las frecuencias de la segunda, tercera y cuarta armónicas son dos, tres y cuatro, multiplicados por la frecuencia de la frecuencia fundamental: 262, 393 y 524 Hz.



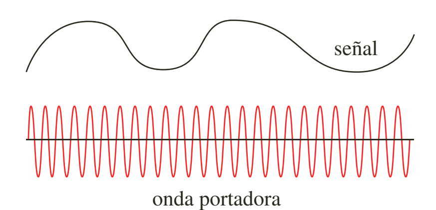
2.6 Ondas de radio

Las ondas de radio son muy utilizadas en el campo de las telecomunicaciones, ya que por medio de ellas es posible la transmisión de información. De acuerdo con la forma en que se transmiten, se reconocen tres tipos de ondas: superficiales, aéreas y espaciales.

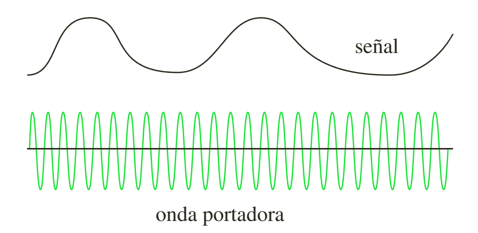
- *Las ondas superficiales* son ondas con frecuencias hasta de 3 MHz, que, de acuerdo con las características del lugar, se propagan por la superficie terrestre.
- *Las ondas áreas* son ondas de frecuencias entre los 3 MHz y los 30 MHz. Estas ondas se propagan por el aire mediante sucesivas reflexiones entre la ionosfera y la superficie terrestre, lográndose de esta manera un gran alcance.
- *Las ondas espaciales* son ondas con frecuencias superiores a los 30 MHz, que pueden alcanzar distancias superiores a los 100 km. La transmisión de estas ondas generalmente se realiza a través de la ionosfera.

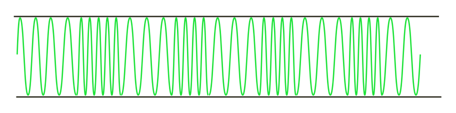
El científico canadiense Reginald Fessenden descubrió la forma de emplear las oscilaciones de las ondas de radio para transmitir información, mediante un proceso denominado *modulación*. La modulación es una técnica para imprimir información (voz, imagen) en una onda de radio llamada *onda portadora*. Debido a este proceso de emisión, las ondas de radio pueden ser de amplitud modulada (AM) o de frecuencia modulada (FM).

- *Amplitud modulada:* en este proceso de modulación, las frecuencias están entre 530 kHz y 1.600 kHz; en consecuencia, la onda portadora tiene un margen de frecuencia para su emisión denominado ancho de banda. En el caso de AM, el ancho de banda es 10 kHz. En la siguiente figura se muestra un esquema de modulación AM.



- *Frecuencia modulada:* en este proceso de modulación, a diferencia de las señales de AM, la amplitud de la onda portadora permanece constante pero la frecuencia es alterada. Los valores de las frecuencias FM están entre 87 MHz y 108 MHz, con un ancho de banda de 200 MHz. En la siguiente figura se puede observar el esquema de modulación FM.





Con seguridad, habrás observado que los aparatos de radio se pueden sintonizar en cualquiera de las dos bandas, AM o FM.





Interpreta

1 La "ola" que producen los espectadores de un partido de fútbol al levantarse y volverse a sentar:

a. ¿En qué se parece a la propagación de una onda?

b. ¿Es una onda transversal o longitudinal? Explica tu respuesta.

2 Establece relaciones entre:

a. El período y la frecuencia de una onda.

b. La velocidad de propagación de una onda y la frecuencia.

c. La longitud de onda y la velocidad de propagación.

d. Las ondas transversales y longitudinales.

e. Cresta y valle de una onda.

3 Un sismo propaga grandes cantidades de energía produciendo daños en las infraestructuras construidas por los hombres. Según la dirección de propagación de las ondas respecto a la dirección del movimiento, las ondas sísmicas son:

a. Transversales.

b. Longitudinales.

c. Electromagnéticas.

d. Lineales.

4 La potencia de una onda depende de:

a. El período.

b. La masa del medio de propagación.

c. Solamente del tiempo.

d. Solamente de la energía transmitida.

5 Cuando se lanza una piedra en un lago, el frente de onda observado en el agua es:

a. Lineal y se propaga en una sola dirección.

b. Lineal y se propaga en todas las direcciones.

c. Circular y se propaga en todas las direcciones.

d. Curvo y se propaga solo en media circunferencia.

6 Explica por qué cuando pasa un vehículo de carga pesada cerca a nosotros se siente como si temblara la Tierra.

7 Explica por qué cuando un objeto flota en el agua y esta se mueve, el objeto permanece en su sitio moviéndose hacia arriba y hacia abajo.



Argumenta

Lee la siguiente información y responde las preguntas 8 a 12 con base en ella.

La sismología es una ciencia que se encarga del estudio de los terremotos. Normalmente, un terremoto se genera a una distancia aproximada de 60 km por debajo de la corteza terrestre. Al punto donde se originan se le denominan foco o hipocentro, y al más próximo sobre la superficie de la tierra, epicentro. Sin embargo, las ondas sísmicas se perciben con mayor intensidad en el epicentro y luego, se dispersan desde él.

8 ¿Cómo se llama la persona encargada de estudiar los terremotos?

9 ¿Por qué un terremoto ocurre en la parte rígida de la corteza terrestre?

10 Normalmente, luego de haber ocurrido un fuerte temblor, las personas se suelen preguntar sobre la localización del epicentro. ¿Qué quiere decir eso?

11 ¿Por qué luego de un terremoto las personas no preguntan por la localización del hipocentro?

12 ¿Has vivido algún terremoto o un temblor muy fuerte? ¿Cuál fue el epicentro?

13 ¿Por qué se puede observar el reflejo de los objetos en cualquier vidrio?

14 Explica por qué, en ocasiones, las olas del mar aumentan su tamaño o lo reducen.

Propone

15 Realiza un esquema donde expliques las partes de una onda.

16 Explica algunas experiencias vividas en las que hayas observado fenómenos ondulatorios o algunas de sus propiedades.

17 Responde. ¿Cómo harías para generar ondas en un estanque y hacer mover un barco de papel? Realiza el experimento y comprueba tu teoría.

18 Realiza un mapa conceptual donde expliques los fenómenos ondulatorios.

19 Utiliza una cuerda para plantear diferentes situaciones que permitan recrear los fenómenos ondulatorios de reflexión, interferencia y refracción. Explícalos a tus compañeros de curso.

Actividades

Verifica conceptos

1 **Escribe V, si la afirmación es verdadera o F, si es falsa. Explica tu respuesta.**

☐ La propagación de las ondas es un mecanismo para transmitir energía de un medio sin que haya transporte de materia.

☐ La línea que une todos los puntos vecinos de una onda se llama frente de onda.

☐ Cuando el movimiento oscilatorio que produce una onda es periódico, se dice que las ondas son circulares.

☐ Cuando las partículas de un medio oscilan en dirección perpendicular a la dirección de propagación, se dice que las ondas son transversales.

☐ En las ondas longitudinales, las partículas del medio oscilan en dirección paralela a la dirección de propagación de la onda.

☐ La amplitud de la onda depende de la longitud de onda.

2 **Elige la afirmación correcta.**

a. Las ondas no transmiten energía.

b. Las ondas transversales son paralelas a la velocidad de propagación.

c. Las ondas se producen por el movimiento armónico simple de las partículas del medio.

d. La densidad lineal de masa en una cuerda depende de la masa del objeto y de su longitud.

3 **Define los siguientes conceptos:**

a. Onda mecánica.
b. Amplitud.
c. Período.
d. Longitud de onda.
e. Onda electromagnética.
f. Velocidad de propagación.

4 **La velocidad de propagación de una onda transversal en una cuerda depende de:**

a. La amplitud.
b. La frecuencia.
c. El período.
d. La fuerza horizontal.
e. La longitud de onda.

5 **Si se desea saber la velocidad de propagación de una onda periódica se debe conocer:**

a. La frecuencia y el período.

b. La frecuencia y la longitud de onda.

c. El período y la amplitud.

d. La amplitud y la frecuencia.

6 **Completa las siguientes afirmaciones:**

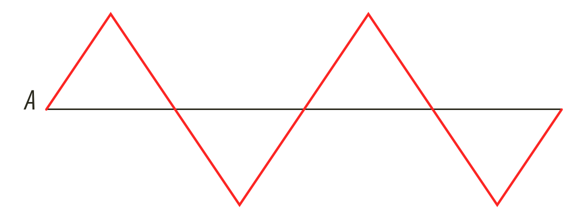
a. En un movimiento oscilatorio, el ________ ________ indica el tiempo que tarda el móvil en realizar una oscilación, mientras que la ________________ es el número de oscilaciones que da el móvil en una unidad de tiempo.

b. Las ________________ aparecen cuando las partículas del medio vibran en dirección perpendicular a la dirección en que se propaga el movimiento ondulatorio y las ________________ aparecen cuando las partículas del medio vibran en la misma dirección en la que se propaga el movimiento ondulatorio.

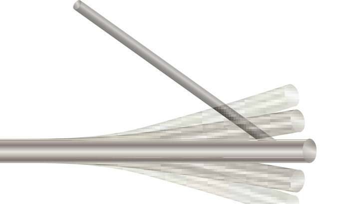
Analiza y resuelve

7 **Responde. ¿Cómo sería la longitud de onda si se hacen vibrar dos cuerdas de distinto material atadas por uno de los extremos?**

8 **Responde. ¿Cómo se tendría que mover una cuerda para que las ondas que se observan sean similares a las que se muestran en la figura?**



9 **Cuando se golpea una varilla por un costado en uno de sus extremos comienza a vibrar como se muestra en la figura. ¿Qué tipo de onda viaja por ella? Explica tu respuesta.**



Actividades

Problemas básicos

10 **Una cuerda de 2 kg de masa se estira entre dos soportes a una distancia de 40 cm. Si la tensión de la cuerda es de 500 N, ¿cuánto tiempo tardará un pulso en viajar de un soporte a otro?**

11 **Una cuerda horizontal se somete a una tensión de 500 N, su masa es de 0,3 kg y su longitud de 150 cm. Si se pone a vibrar con una amplitud de 0,3 m, halla:**

a. La densidad longitudinal de la masa.

b. La velocidad de la onda.

c. La función de onda si la frecuencia es 25 s^{-1}.

12 **Si la velocidad de una onda es de 36 km/h y su frecuencia de 2 Hz, determina la longitud de onda en centímetros.**

13 **La densidad lineal de una cuerda es 0,0125 kg/m y está sometida a una tensión de 125 N. Calcula la velocidad de propagación.**

14 **Un pato que nada en un estanque efectúa cuatro oscilaciones en 5 s. Calcula el período de las ondas causadas por las oscilaciones del pato.**

15 **Calcula la velocidad de propagación de las ondas y su período, sabiendo que la longitud de esta propagación es de 25 cm.**

16 **Un bote que se encuentra flotando en el mar completa ocho oscilaciones en 10 s. Si las ondas de agua en el mar van a una velocidad de 4 m/s, ¿cuál es la longitud de onda?**

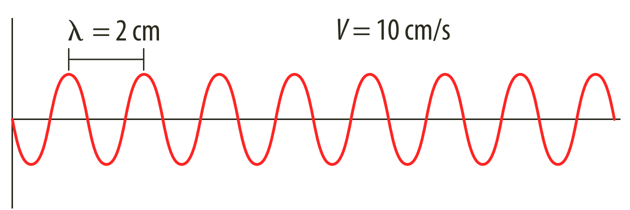
17 **Ciertos quirópteros, como el murciélago, emiten ultrasonidos. Si la frecuencia del sonido emitido es de 3×10^5 Hz, ¿cuál será la longitud de onda de la misma?**

18 **Un bote que se encuentra anclado es movido por ondas cuyas crestas están separadas 15 m y cuya rapidez es de 6 m/s. ¿Con qué frecuencia las olas llegan al bote?**

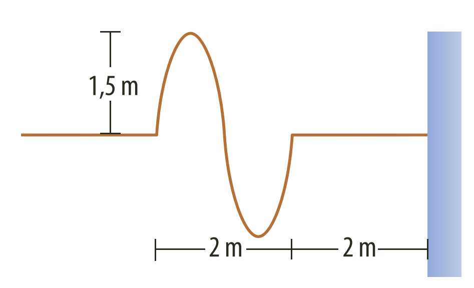
19 **Una onda longitudinal de $\lambda = 2$ cm se propaga en razón de 40 cm en 10 s. ¿Cuánto vale el período? ¿Cuál es su frecuencia?**

20 **Un frente de onda se propaga por la superficie de un estanque con un período de 4 s y una velocidad de 20 m/s. ¿Cuál es el valor de la longitud de onda correspondiente?**

21 **Encuentra el período y la frecuencia del movimiento ondulatorio representado en el gráfico.**



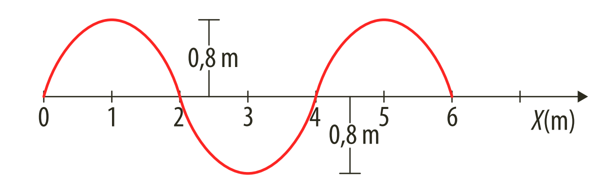
22 **La perturbación sinusoidal representada en la figura para un instante $t = 0$, se propaga de izquierda a derecha en una cuerda que se encuentra fija en su extremo derecho. Si la velocidad de propagación de la onda es de 3 m/s, ¿qué distancia recorre la onda si han transcurrido 2 s después de iniciar la perturbación?**



23 **La figura muestra la propagación de una onda periódica con una frecuencia de 10 Hz. Halla:**

a. La amplitud.

b. La velocidad de propagación.

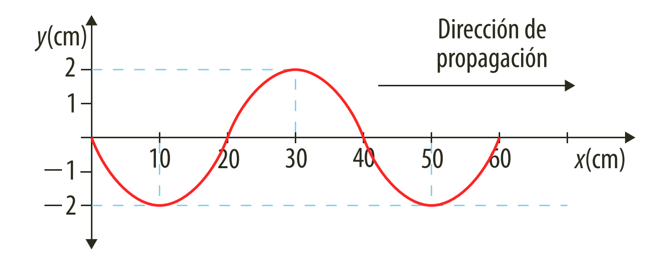


24 **Una cuerda oscila con una frecuencia de 50 Hz como se observa en la gráfica. Halla:**

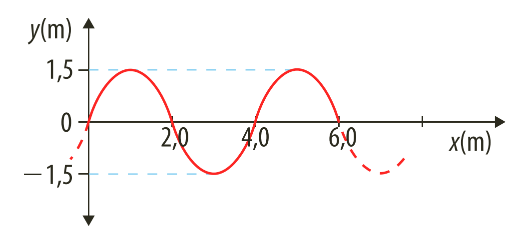
a. La amplitud de oscilación.

b. El período de oscilación.

c. La velocidad de propagación.

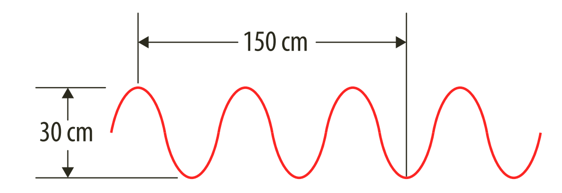


25 **Una onda tiene una frecuencia de 40 Hz y se comporta como se observa en la gráfica.**

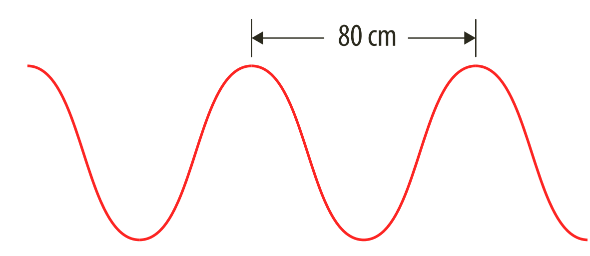


Con las condiciones presentadas, halla el valor de la amplitud y la velocidad de propagación de la onda.

26 **Una onda mecánica se propaga en cierto medio a 1,5 m/s y presenta las características mostradas en la gráfica. ¿Cuál es la frecuencia de la onda?**

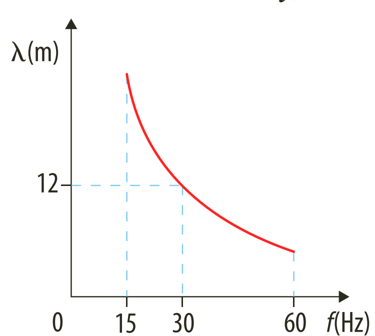


27 **Una onda periódica se propaga con una velocidad de 20 cm/s como se observa en la figura. ¿Cuál es el período de la onda?**



Problemas de profundización

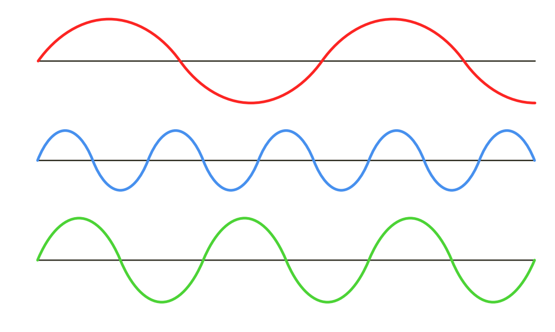
28 **A través de un dispositivo se producen ondas en un medio elástico, de forma que las frecuencias oscilan entre los 15 y 60 Hz, respectivamente. La gráfica muestra cómo varía la longitud de onda (λ) en función de la frecuencia (*f*):**



a. Calcula la longitud de onda menor para esta experiencia.

b. Para una longitud de onda de 12 m, ¿cuál es el período de una onda?

29 **Las tres ondas que se representan en esta ilustración se propagan a la misma intensidad.**



a. ¿Cuál de las tres tiene mayor frecuencia? ¿Por qué?

b. ¿Cuál de las tres tiene mayor longitud de onda? ¿Por qué?

30 **La velocidad de una onda longitudinal en un fluido se expresa mediante la fórmula**

$$v = \sqrt{\frac{1}{\rho k}}$$

donde *k* es el coeficiente de compresibilidad del medio y ρ es la densidad. El módulo de compresibilidad del agua es 13 veces el del mercurio y la densidad del mercurio es 13,6 veces la del agua. ¿Cuál es la razón entre la velocidad de las ondas longitudinales en el mercurio y la velocidad de las ondas longitudinales en el agua?

31 **Una persona observa en una piscina un flotador que realiza 12 oscilaciones en 20 segundos. Si cada pulso tarda 2,5 segundos en recorrer una distancia de 9 m, ¿cuál será la longitud de onda de las ondas en la piscina?**

32 **La cuerda de una guitarra tiene una densidad lineal de 0,015 kg/m y una masa de 8 g. Si la velocidad de propagación de las ondas en la cuerda es de 150 m/s, halla:**

a. La longitud de la cuerda.

b. La tensión que experimenta la cuerda.

33 **Una cuerda que realiza seis oscilaciones en 1,5 s, transmite una energía de 0,08 J. Si la velocidad de propagación de la onda es 18 m/s y su masa es de 0,04 kg, ¿cuál es la amplitud de la onda?**

Actividades

Verifica conceptos

1 **Escribe V, si la afirmación es verdadera o F, si es falsa. Justifica tu respuesta.**

- ☐ En el fenómeno de la reflexión, para espejos planos, el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión.
- ☐ El fenómeno de la refracción ocurre cuando la onda choca con un obstáculo y regresa nuevamente.
- ☐ El principio de Huygens dice que un punto no es un nuevo frente de onda pero la velocidad de las ondas se mantiene constante después de chocar con un obstáculo.
- ☐ La difracción sucede cuando una onda pasa por un obstáculo tan pequeño como el orden de magnitud de la longitud de onda.
- ☐ En las señales de frecuencia modulada la amplitud de la onda permanece constante.
- ☐ En las señales de amplitud modulada, la frecuencia es alterada con variaciones de señales de audio enviadas.

2 **Define los siguientes conceptos:**

a. Refracción.
b. Reflexión.
c. Interferencia.
d. Ley de Snell.
e. Principio de Huygens.
f. Onda estacionaria.

Elige la respuesta correcta.

3 **La interferencia destructiva se da cuando:**

- ☐ Chocan dos crestas.
- ☐ Choca una cresta con un valle.
- ☐ Chocan dos valles.
- ☐ Ninguna de las anteriores.

4 **Una onda reflejada es:**

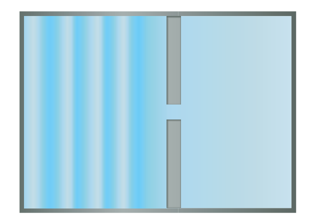
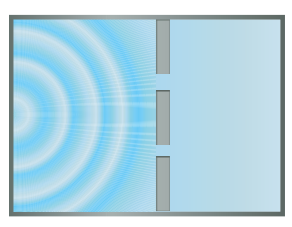
- ☐ Un frente de ondas secundario que se genera gracias a un obstáculo.
- ☐ Una onda que pasa de un medio a otro cambiando su velocidad de propagación.
- ☐ Es aquella que se genera después de chocar con un obstáculo.
- ☐ Onda que llega libremente a un obstáculo.

Analiza y resuelve

5 **Si te encuentras de excursión por el campo y a lo lejos se divisa un acantilado, compruebas que la pared del acantilado produce eco. Explica cómo se puede calcular a qué distancia se encuentra.**

6 **Explica por qué en cada extremo fijo de una cuerda en la cual se produce una onda estacionaria siempre hay un nodo.**

7 **Observa los siguientes diagramas y realiza una representación de los frentes de ondas.**

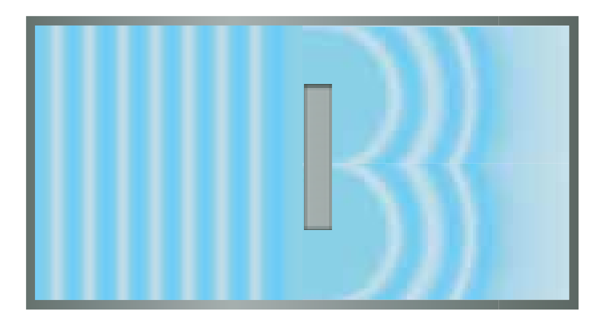



8 **Al saltar lazo se puede observar que el movimiento que describe la cuerda tiene la forma de una onda estacionaria. ¿Se podría considerar esta situación como un ejemplo de onda estacionaria? Explica tu respuesta.**

9 **Explica a partir de un esquema cómo funciona el sonar empleado para medir la profundidad del fondo marino. Indica qué fenómeno ondulatorio se utiliza.**

10 **Algunas de las características de las ondas son la frecuencia, la longitud de onda, la velocidad de propagación y el período. De las anteriores características nombradas, ¿cuáles permanecen constantes y cuáles sufren algún cambio cuando se presenta el fenómeno de reflexión? ¿Qué sucederá cuando se presente el fenómeno de refracción?**

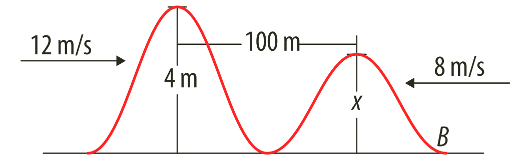
11 **Un movimiento ondulatorio se propaga hasta encontrarse con el obstáculo AB, como se muestra en la figura. Explica qué fenómeno ondulatorio se puede presentar después de cruzar la onda el obstáculo.**





Problemas básicos

12 **Responde. ¿Cuál es la amplitud de la onda "B" si la interferencia producida tiene una amplitud de 6 m? ¿Qué tiempo tarda en darse dicha interferencia?**

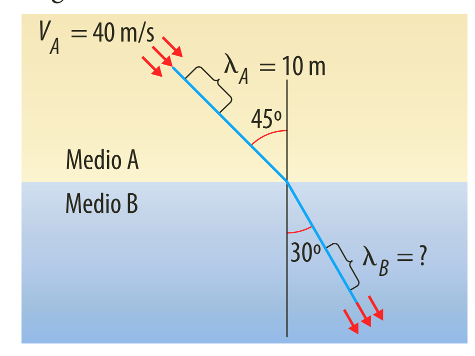


13 **La imagen representa una onda periódica refractada. Determina:**

a. La frecuencia de la onda.

b. La velocidad de la onda en el medio B.

c. La longitud de onda en el medio B.



14 **Una onda se propaga en un medio A, con una velocidad de 0 m/s. Luego, incide en un medio B con un ángulo de 30°, donde su velocidad de propagación será $20\sqrt{3}$ m/s. ¿Cuál es el ángulo de refracción de la onda considerada?**

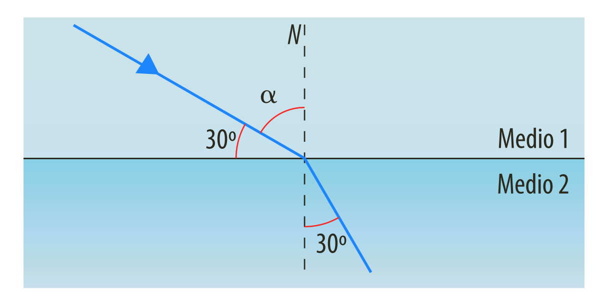
15 **La imagen muestra una onda que pasa de un medio 1 a un medio 2. En el medio 1 la frecuencia de la onda es 1 kHz y su velocidad de propagación $10\sqrt{3}$ m/s. Halla:**

a. La frecuencia de la onda en el medio 2.

b. La longitud de onda en el medio 1.

c. La velocidad de propagación en el medio 2.

d. El índice de refracción del medio 2 con respecto al medio 1.



16 **En la superficie de un lago hay dos frentes de ondas coherentes en fase con una frecuencia de 5 Hz. La velocidad de propagación es 2 cm/s. En el punto *P* hay una fluctuación como se observa en la figura. Halla:**

a. ¿Cuál es la longitud de onda de las perturbaciones que se propagan en el lago?

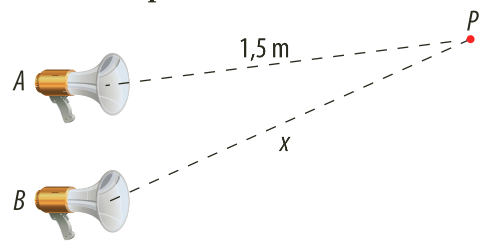
b. ¿Qué diferencia de recorrido hay entre las ondas?

c. ¿Qué tipo de interferencia se debe dar en el punto de encuentro?



Problemas de profundización

17 **La figura muestra dos parlantes separados por una distancia de 2 m. Los parlantes emiten ondas sonoras con una frecuencia de 68 kHz. El punto *P* mostrado en la figura está a una distancia de 1,5 m del parlante *A*.**



Si la velocidad de propagación del sonido es igual a 340 m/s, ¿cuál es la distancia mínima *x* del parlante *B* para que el punto *P* sea un nodo?

18 **Dos fuentes de onda F_1 y F_2, separadas cierta distancia, están en fase y producen ondas con longitudes de 2 cm. En un punto *P*, la superficie del agua dista 9 cm de F_1 y 12 cm de F_2. Responde:**

a. ¿Cuántas longitudes de onda hay entre *P* y F_1 y entre *P* y F_2?

b. ¿En el punto *P* las ondas producidas por F_1 y F_2 forman una interferencia destructiva o constructiva? Justifica tu respuesta.

19 **Dos ondas viajeras con igual amplitud e igual longitud de onda se propagan a lo largo de una cuerda en direcciones contrarias. Determina cuál es la distancia entre dos nodos consecutivos.**

20 **En una cuerda se produce una onda estacionaria con tres nodos que están separados entre sí a una distancia de 15 cm, ¿cuál es la longitud de onda de las ondas que las generan? Si la tensión a la que está sometida es de 10 N y la masa por unidad es de 0,3 kg/m, determina la frecuencia de vibración.**

Frentes de onda

Cuando se produce una perturbación en uno o varios puntos de un medio, la perturbación se propaga a lo largo de este en todas las direcciones. Un frente de onda es la línea que une todos los puntos vecinos de una onda que vibran en fase. La velocidad de propagación de las ondas depende del medio a través del cual se mueven. Cuando se produce una onda periódica, le asociamos a la onda una frecuencia de vibración y una longitud de onda. La velocidad de propagación *(v)*, la frecuencia *(f)* y la longitud de onda (λ) se relacionan mediante la expresión $v = \lambda \cdot f$.

Cuando las ondas chocan con un obstáculo se produce el fenómeno de reflexión y cuando cambian de medio de propagación se produce el fenómeno de refracción.

En esta práctica nos proponemos estudiar el comportamiento de las ondas a partir de la observación de frentes de onda en la superficie del agua.

Conocimientos previos

Fenómenos ondulatorios y velocidad de propagación.

Materiales

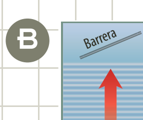
- Cubeta de ondas
- Lámpara
- Lápiz
- Barrera plana
- Regla
- Barrera circular

Procedimiento

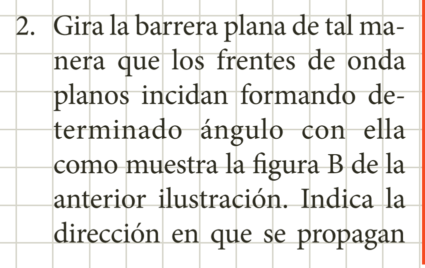
1. Produce pulsos planos y utiliza una barrera recta, contra la cual chocan los pulsos producidos según te indica la figura A de la siguiente ilustración.

   Describe los frentes de onda que se reflejan. Represéntalos gráficamente.



2. Gira la barrera plana de tal manera que los frentes de onda planos incidan formando determinado ángulo con ella como muestra la figura B de la anterior ilustración. Indica la dirección en que se propagan las ondas al alejarse de la barrera, es decir, cuando ya han chocado. Repite el experimento varias veces para establecer la relación entre la dirección del frente de onda incidente y la dirección del frente de onda reflejado en la barrera.
3. Coloca una barrera circular como muestra la siguiente ilustración. Haz incidir frentes de onda en la barrera circular en cada caso y describe la configuración de los frentes de onda después de reflejarse.



4. Verifica con cuál de las dos barreras circulares, los pulsos al alejarse, después de la reflexión, se dirigen hacia el mismo punto. Con el lápiz, genera frentes de onda circulares en dicho punto y describe la configuración de los pulsos después de chocar contra la barrera.
5. Con el lápiz, genera pulsos circulares para que se reflejen en la barrera recta. Describe la configuración de los frentes de onda reflejados en la barrera.

Análisis de resultados

1. ¿Cómo se relaciona la dirección de los frentes de onda planos incidentes en una barrera plana con la dirección de los frentes reflejados en esta?
2. ¿En qué punto producirías unos frentes de onda iguales a los que se reflejaron en la barrera plana cuando incidieron en ella frentes de onda circulares?

Movimiento ondulatorio

En la naturaleza encontramos diferentes formas de movimiento mecánico, pero una de las más difundidas en nuestro entorno es el movimiento ondulatorio. En el **movimiento ondulatorio** se distinguen características como frecuencia, período y longitud de onda que dan una descripción más detallada.

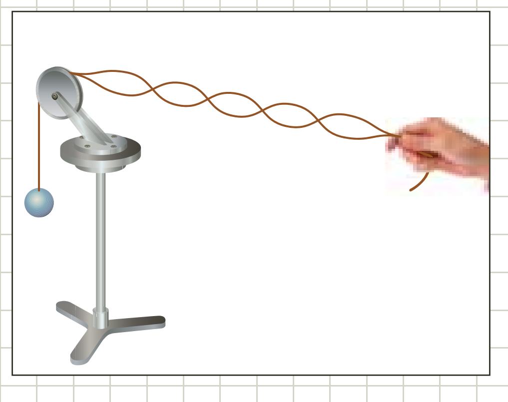
Es esta práctica se desea comprender el modelo ondulatorio y algunas características de las ondas.

Conocimientos previos

Longitud de onda, período y frecuencia.

Materiales

- Soporte con varilla
- Una polea pequeña
- Dos metros de cuerda
- Juego de masas
- Porta pesas



Procedimiento

Procedimiento

1. Fija la polea al soporte y ubica el sistema sobre tu mesa de trabajo.
2. Ata una masa pequeña al extremo de la cuerda.
3. Haz pasar la cuerda por la polea y estírala horizontalmente, sosteniéndola con una sola mano. Ubícate a 1,5 metros de distancia de la polea.
4. Realiza con tu mano movimientos ascendentes y descendentes, de modo que la cuerda vibre libremente. Es necesario que el movimiento de la mano sea constante y conserve la misma amplitud.
5. Mide la amplitud y la longitud de onda. Realiza la medición del proceso cinco veces y calcula el promedio de ellas. Escribe el valor obtenido en la tabla de registro.

Tabla de registro

Masa (g)	Longitud de onda (cm)	Amplitud (cm)
10		
20		
50		
70		
100		

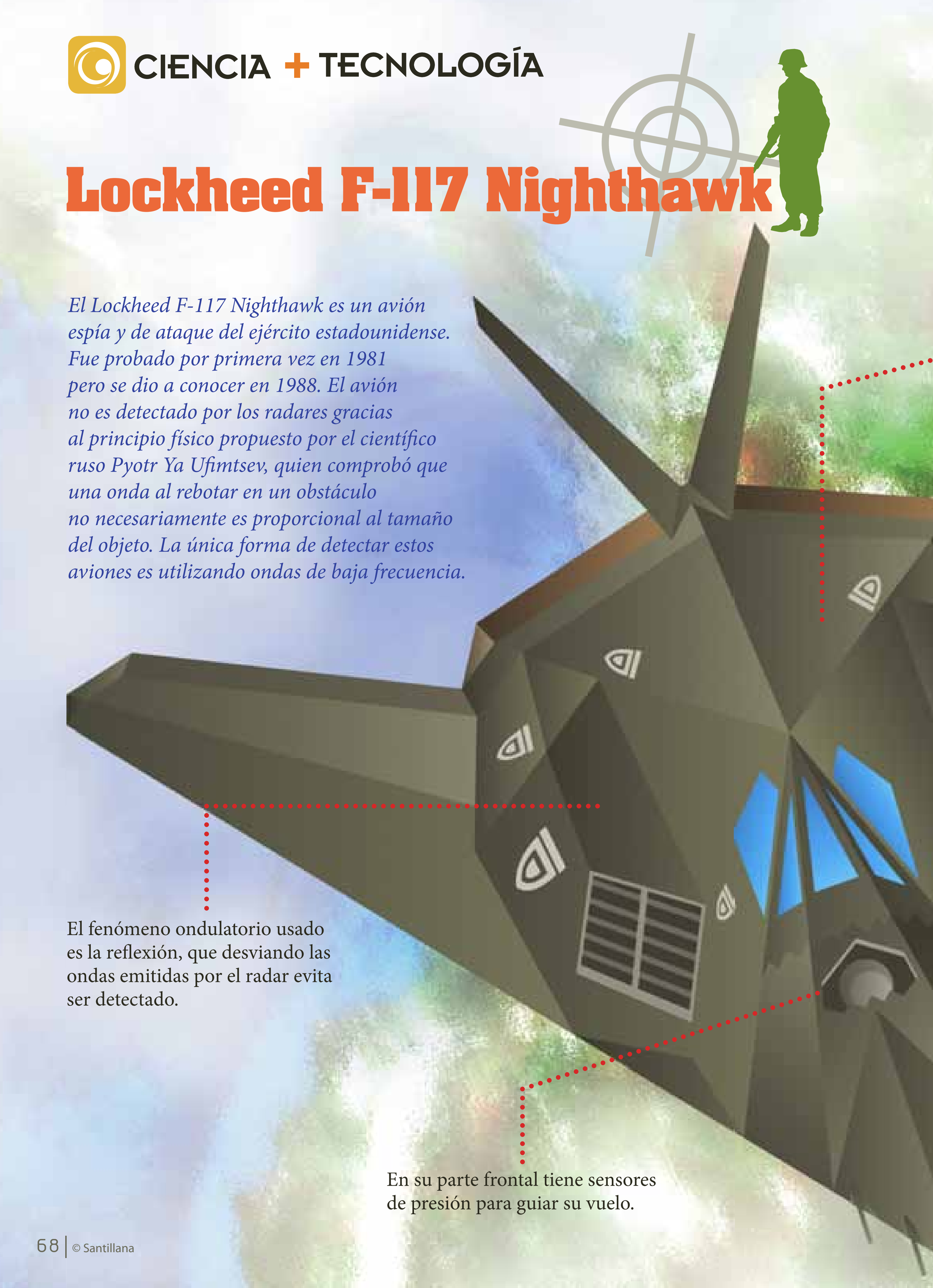
6. Aumenta la masa suspendida a 20, 50, 70 y 100 gramos. Para cada masa repite los procedimientos 4 y 5. Registra en la tabla los datos obtenidos.
7. Modifica la longitud de la cuerda que vibra y verifica su movimiento para los diferentes pesos. Registra tus observaciones.

Análisis de resultados

1. ¿Qué tipos de características presentan las ondas que se formaron en esta experiencia?
2. ¿Qué efecto tiene la tensión de la cuerda en relación con la producción de las ondas?
3. ¿Qué efecto tiene el largo de la cuerda respecto a las ondas producidas?
4. ¿De qué manera varían la longitud de onda, la frecuencia y la cantidad de nodos con relación a la tensión y el largo de la cuerda?
5. ¿De qué manera podrías medir la frecuencia o el período de la vibración de la mano?

Lockheed F-117 Nighthawk

El Lockheed F-117 Nighthawk es un avión espía y de ataque del ejército estadounidense. Fue probado por primera vez en 1981 pero se dio a conocer en 1988. El avión no es detectado por los radares gracias al principio físico propuesto por el científico ruso Pyotr Ya Ufimtsev, quien comprobó que una onda al rebotar en un obstáculo no necesariamente es proporcional al tamaño del objeto. La única forma de detectar estos aviones es utilizando ondas de baja frecuencia.



El fenómeno ondulatorio usado es la reflexión, que desviando las ondas emitidas por el radar evita ser detectado.

En su parte frontal tiene sensores de presión para guiar su vuelo.



El F-117 puede volar
a una velocidad de 993 km/h
y su altura de vuelo es de 20.000 m.

La cabina para una persona está dotada de sofisticados sistemas de navegación. Los objetivos en el combate son logrados por imagen térmica de infrarrojos que dan mayor precisión en los ataques.

Su forma geométrica, similar a la de un diamante, ofrece un ángulo aproximado de 50° para desviar las ondas de los radares hacia los lados y así evitar ser detectado.

Los misiles, para evitar ser detectados, también deben estar en bahías independientes en el interior del avión.



UNIDAD 3

Acústica

Temas de la unidad

1. El sonido
2. Sistemas resonantes



Para pensar…

El interés por la acústica ha aumentado debido a las diferentes formas novedosas para transmitir, registrar y reproducir sonidos. Esta es la era de la alta fidelidad, donde el CD y el DVD juegan un papel importante, además de los diferentes formatos de reproducción, entre ellos el WAVE, el MIDI y el MP4.

La combinación de ritmos nuevos que mezclan los armónicos de una guitarra o un violín con la música computarizada de los sintetizadores, hacen que hoy las formas de las ondas sonoras y la superposición de sonidos formen parte de la cotidianidad.

En esta unidad abordaremos la naturaleza del sonido, la rapidez de propagación, las características, los usos de la reflexión y refracción de ultrasonidos, el fenómeno de interferencia, la aplicación del efecto Doppler, las ondas sonoras en los instrumentos musicales, la audibilidad y la voz humana.

Para responder…

- ¿Qué formatos digitales de reproducción musical conoces?
- ¿Cómo se propaga el sonido?
- ¿Qué es un armónico?
- ¿El sonido es una onda? Explica tu respuesta.



Figura 1. Los murciélagos perciben el espacio al escuchar el eco de los ultrasonidos que emiten.

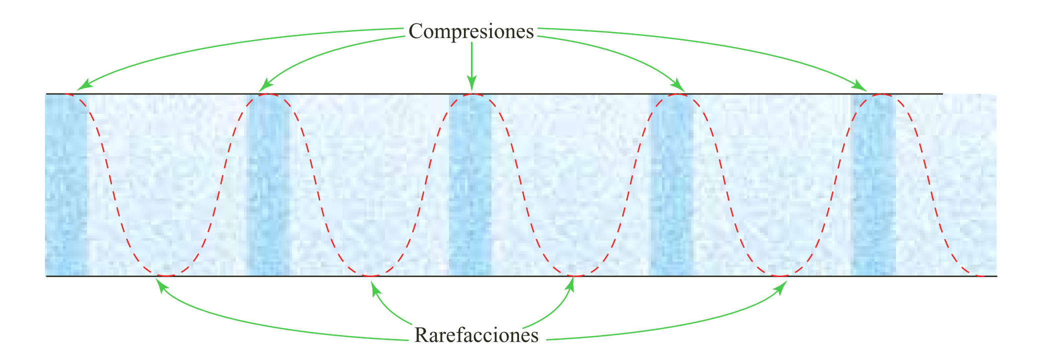
1. El sonido

1.1 Naturaleza del sonido

Cuando golpeas un cuerpo o pulsas un instrumento musical o cuando escuchas una conversación del otro lado de una pared, etc., en tu oído se produce un efecto psicofisiológico denominado sonido.

El sonido es una onda longitudinal y mecánica, es decir, que necesita un medio material para su propagación. Por ejemplo, al golpear una mesa, es posible escuchar el golpe debido a que se hace vibrar la mesa y esas vibraciones se propagan en el aire (medio material) hasta ser captados por el oído.

La vibración de un cuerpo se propaga en el aire, dando lugar a un movimiento longitudinal de las partículas de aire vecinas al foco emisor sonoro, las cuales, al recibir cierta presión, se alejan de su punto de equilibrio provocando una rarefacción en ese sitio y una compresión hacia las partículas más cercanas; así el movimiento de las partículas de aire es paralelo a la dirección de propagación. La siguiente figura muestra las compresiones y rarefacciones del aire durante el paso de una onda sonora.



Al igual que toda onda, el sonido experimenta una reflexión al chocar contra un obstáculo, y produce de esta manera un resultado denominado eco. Este fenómeno se basa en el hecho de que las ondas sonoras pueden reflejarse en superficies rígidas, y regresa a nosotros después de cierto tiempo de emitido el sonido. Este principio es empleado, entre otros, por los murciélagos para su ubicación espacial (figura 1), y por los barcos que usan sonar (sistema que sirve para detectar objetos en el mar).

1.2 Velocidad del sonido

Todos sabemos que cuando llueve fuertemente y se producen rayos, aunque el relámpago y el trueno se producen en el mismo instante, el trueno se oye después de haber visto la luz del relámpago. La razón es que la velocidad de la luz es mayor que la velocidad del sonido en el aire.

Como en todas las ondas, la velocidad del sonido depende de las características del medio donde se propaga. Estos factores son la compresibilidad y la densidad. Además de estos factores, en los gases se consideran la masa molecular del gas y la temperatura.

- **Compresibilidad:** se dice que un material es más compresible que otro si experimenta mayor deformación o disminución del volumen cuando ambos materiales se someten a la misma presión. A menor compresibilidad del medio, mayor rapidez del sonido.
- **Densidad:** a menor densidad del medio mayor rapidez de propagación del sonido. Por ejemplo, si dos sólidos tienen la misma compresibilidad, el sonido se propaga con mayor rapidez en el menos denso.
- **Masa molecular:** en los gases, cuando la masa molecular es menor, la rapidez de propagación del sonido aumenta.
- **Temperatura:** en los gases ocurre que, a mayor temperatura, mayor es la velocidad, ya que al aumentar la temperatura, la rapidez de las moléculas del medio aumenta, lo que ocasiona un incremento en la rapidez de la propagación. Experimentalmente se ha comprobado que, para temperaturas comprendidas entre 0 y 35 °C, la velocidad del sonido aumenta 0,6 m/s por cada grado Celsius que aumente la temperatura. A 0 °C, la velocidad del sonido en el aire es 331 m/s, luego la expresión que relaciona la velocidad del sonido en el aire, expresada en m/s, con la temperatura, expresada en °C, es

$$v = 331 \text{ m/s} + 0{,}6 \text{ m/s} \cdot T \cdot {}°\text{C}^{-1}$$

Tabla 3.1

Medio	Velocidad del sonido (m/s)
Aire (0 °C)	331
Aire (15 °C)	340
Aire (100 °C)	336
Helio (0 °C)	992
Hidrógeno (0 °C)	1.290
Oxígeno (0 °C)	317
Agua (25 °C)	1.490
Aluminio	5.100
Cobre	3.560
Hierro	5.130
Plomo	1.320
Granito	6.000

EJEMPLOS

1. **¿En qué momento llega a nosotros el sonido de la campana de una iglesia si nos encontramos a un cuarto de kilómetro de distancia y la temperatura del aire es de 15 °C?**

Solución:

Para determinar el tiempo en el cual escuchamos el sonido, utilizamos la siguiente expresión:

$$v = \frac{d}{t}$$

$$t = \frac{d}{v}$$ *Al despejar t de la ecuación*

Como un cuarto de kilómetro equivale a 250 m, entonces:

$$t = \frac{250 \text{ m}}{340 \text{ m/s}} = 0{,}73 \text{ s}$$ *Al remplazar y calcular*

El sonido producido por la campana se escucha a los 0,73 s de haberse producido.

2. **En Bogotá, en los días calurosos, la temperatura suele pasar de 0 °C a 21 °C.**
   a. ¿Cuál es la velocidad del sonido a 21 °C?
   b. ¿En cuánto aumenta la velocidad del sonido?

Solución:

a. Para hallar la velocidad:

$$v = 331 \text{ m/s} + 0{,}6 \text{ m/s} \cdot \text{T} \cdot {}°\text{C}^{-1}$$

$$v = 331 \text{ m/s} + 0{,}6 \text{ m/s} \cdot 21\ °\text{C} \cdot \text{C}^{-1}$$ *Al remplazar*

$$v = 343{,}6 \text{ m/s}$$ *Al calcular*

La velocidad del sonido en el aire a 21 °C es 343,6 m/s.

b. La diferencia entre las velocidades es:

$$\Delta v = 343{,}6 \text{ m/s} - 331 \text{ m/s}$$ *Al diferenciar*

$$\Delta v = 12{,}6 \text{ m/s}$$ *Al calcular*

Al pasar la temperatura de 0 °C a 21 °C, la velocidad aumenta en 12,6 m/s.

EJERCICIO

El sonido emitido por una sirena tiene una longitud de onda de 30 mm. ¿Cuál es la frecuencia de ese sonido?

1.3 Características del sonido

Al comparar dos sonidos podemos establecer, entre ellos, algunas diferencias. Por ejemplo, es fácil identificar la voz de una persona cuando la escuchamos, o distinguir entre una nota alta y otra nota baja, o entre un sonido fuerte y otro sonido débil. Estas son las características del sonido conocidas como tono, intensidad y timbre.

1.3.1 El tono

El tono o altura de un sonido es la característica que se refiere a los sonidos altos o agudos y a los bajos o graves. Esta cualidad se debe a la frecuencia del sonido, ya que, cuanto mayor sea la frecuencia, más agudo es el sonido y cuanto menor sea la frecuencia, más grave es el sonido.

Para analizar esta característica, en el laboratorio se utilizan los diapasones, que son instrumentos metálicos que al ser golpeados producen un sonido en una frecuencia determinada.

La sensibilidad del oído humano percibe sonidos cuyas frecuencias oscilan entre los 20 Hz y 20.000 Hz. Los sonidos mayores de 20.000 Hz se denominan **ultrasonidos** y los menores de 20 Hz se denominan **infrasonidos**. Algunos animales como el perro perciben ultrasonidos muy cercanos a los 50.000 Hz y los murciélagos hasta 100.000 Hz. Se ha comprobado que los delfines emiten ondas ultrasónicas que les permiten "ver" a través de los cuerpos de otros animales y de las personas. Para los delfines los músculos y la piel son casi transparentes; además pueden observar huesos, dientes y cavidades llenas de gas. El delfín podría detectar evidencias de cáncer o tumores presentes en nuestro organismo. Las ondas ultrasónicas tienen su uso en la medicina para hacer exámenes diagnósticos por medio de ecografías y para destruir cálculos renales sin necesidad de realizar cirugías. Las ondas de infrasonido son características de las ondas sísmicas.

Los instrumentos musicales emiten notas a frecuencias menores de 4.000 Hz, así por ejemplo, la frecuencia de la nota do natural es de 256 Hz y la de la nota la es 440 Hz, lo cual implica que la nota la sea más alta que la nota *do*.

EJEMPLO

Un diapasón al ser golpeado emite la nota mi, es decir 660 Hz.
¿Cuál es la longitud de la onda sonora si la temperatura ambiente es de 10 °C?

Solución:

Para hallar λ, debemos conocer su velocidad.

$$v = 331\ \text{m/s} + 0{,}6\ \text{m/s} \cdot \text{T} \cdot {}^{\circ}\text{C}^{-1}$$

$$v = 331\ \text{m/s} + 0{,}6\ \text{m/s} \cdot 10\ {}^{\circ}\text{C} \cdot \text{C}^{-1}$$ *Al remplazar*

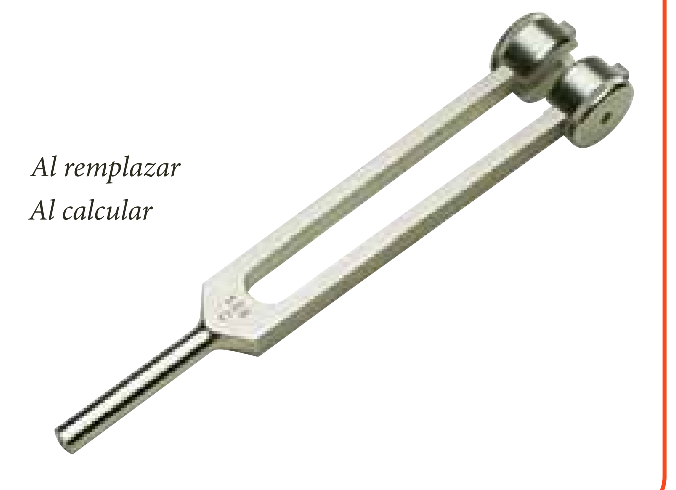
$$v = 331\ \text{m/s}$$ *Al calcular*

Por tanto,

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

$$\lambda = \frac{337\ \text{m/s}}{660\ \text{s}^{-1}} = 0{,}51\ \text{m}$$

La longitud de onda del sonido es 0,51 m.



1.3.2 Intensidad

La intensidad del sonido se relaciona con lo que comúnmente se conoce como el volumen del sonido. Lo cual permite diferenciar los sonidos fuertes de los débiles.

Definición

La intensidad del sonido es la energía que transporta una onda por unidad de tiempo y de área, y es proporcional al cuadrado de su amplitud.

La potencia sonora es la energía emitida por el foco sonoro en un segundo y la intensidad es la potencia transmitida por unidad de superficie. La intensidad del sonido se mide en vatios sobre metro cuadrado (W/m^2).

El oído humano puede detectar sonidos de una intensidad tan baja como 10^{-12} W/m^2, y tan alta como 1 W/m^2; arriba de este límite todo sonido causa dolor. Esta sensación del oído se describe por medio de una característica subjetiva llamada sonoridad, que hace referencia a los niveles de intensidad de un sonido.

Nivel de intensidad

El nivel de intensidad de una onda sonora está dado por una escala logarítmica que compara la intensidad, I, del sonido con la intensidad más baja perceptible al oído humano y se expresa como:

$$\beta = 10 \text{ dB} \cdot \text{Log } \frac{I}{I_0}$$

Donde I_0 es la intensidad correspondiente a 10^{-12} W/m^2, e I es la intensidad del sonido a la que nos referimos. El nivel de intensidad se expresa en decibeles y se denota con dB. La tabla 3.2 muestra las equivalencias entre las intensidades de algunos sonidos y su respectivo nivel de intensidad.

Los sonidos con intensidades muy altas (120 dB y 125 dB) producen dolor y daños en el oído, al igual que algunos niveles bajos (95 dB y 90 dB) que dañan el oído, si es expuesto por mucho tiempo.

Tabla 3.2

Sonido	Intensidad (W/m^2)	Nivel de intensidad
Motor de reacción	10^2	140
Umbral del dolor	1	120
Automóvil sin silenciador	10^{-2}	100
Fábrica con máquinas	10^{-4}	80
Conversación en voz alta	10^{-6}	60
Biblioteca tranquila	10^{-8}	40
Susurro	10^{-10}	20
Umbral de audición	10^{-12}	0

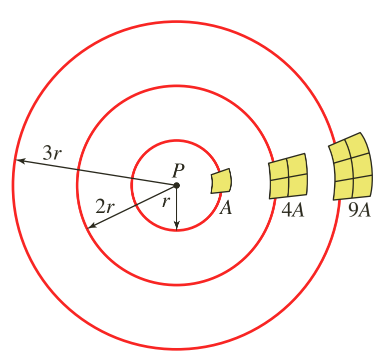


Figura 2. Variación del área superficial del frente de onda con respecto a la variación del radio.

Variación de la intensidad

Existen dos factores que influyen en el aumento o en la disminución de la intensidad: el medio de propagación y la distancia a un foco emisor. Se dice que el medio en el cual se propaga el sonido disminuye su intensidad puesto que él absorbe energía.

Por otro lado, la intensidad de un sonido disminuye si se aumenta la distancia con respecto al foco emisor o fuente. Cuando el foco emite un sonido, este se propaga en todas las direcciones, produciendo un frente de onda esférico.

El área de esa superficie es $4\pi \cdot r^2$, por tanto, la intensidad del sonido a una distancia, r, de la fuente es:

$$I = \frac{P}{A} = \frac{P}{4\pi \cdot r^2}$$

La figura 2 muestra la variación del área superficial del frente de onda cuando aumenta el radio, es decir, la distancia. Si el radio se duplica, el área sobre el cual se distribuye el sonido se cuadruplica y la intensidad se hace cuatro veces menor. Si el radio se triplica, la intensidad se reduce a la novena parte.

EJEMPLO

En un campo abierto Óscar llama a Gustavo con una potencia de 10^{-8} W pero este no lo escucha. Si Andrés, que se encuentra a 50 cm de Óscar, logra escuchar el llamado:

a. ¿A qué distancia se encuentra Gustavo con respecto a Óscar?

b. ¿Con qué nivel de intensidad Andrés escucha a Óscar?

Solución:

a. Para que un sonido no se perciba debe tener una intensidad de 10^{-12}, entonces:

$$I = \frac{P}{4\pi \cdot r^2} \qquad \textit{Ecuación de intensidad de sonido}$$

$$r = \sqrt{\frac{P}{4\pi \cdot I}} \qquad \textit{Al despejar } r$$

$$r = \sqrt{\frac{10^{-8}\ \text{W}}{4\pi \cdot 10^{-12}\ \text{W/m}^2}} \qquad \textit{Al remplazar}$$

$$r = 28{,}21\ \text{m} \qquad \textit{Al calcular}$$

La distancia mínima a la cual se encuentra Gustavo con respecto a Óscar es 28,21 m.

b. Para hallar el nivel de intensidad, se requiere hallar la intensidad del sonido:

$$I = \frac{P}{4\pi \cdot r^2} \qquad \textit{Ecuación de intensidad de sonido}$$

$$I = \frac{10^{-8}\ \text{W}}{4\pi\ (0{,}5\ \text{m})^2} \qquad \textit{Al remplazar}$$

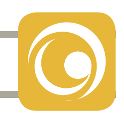
$$I = 3{,}2 \times 10^{-9}\ \text{W/m}^2 \qquad \textit{Al calcular}$$

$$\beta = 10\ \text{dB} \cdot \text{Log}\ \frac{I}{I_0} \qquad \textit{Ecuación del nivel de intensidad}$$

$$\beta = 10\ \text{dB} \cdot \text{Log}\ \frac{3{,}2 \times 10^{-9}}{10^{-12}} \qquad \textit{Al remplazar}$$

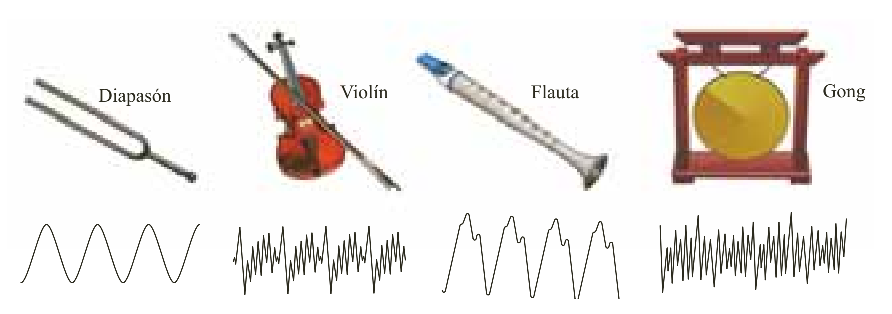
$$\beta = 35\ \text{dB} \qquad \textit{Al calcular}$$

Andrés escucha a Oscar con un nivel de intensidad de 35 dB.



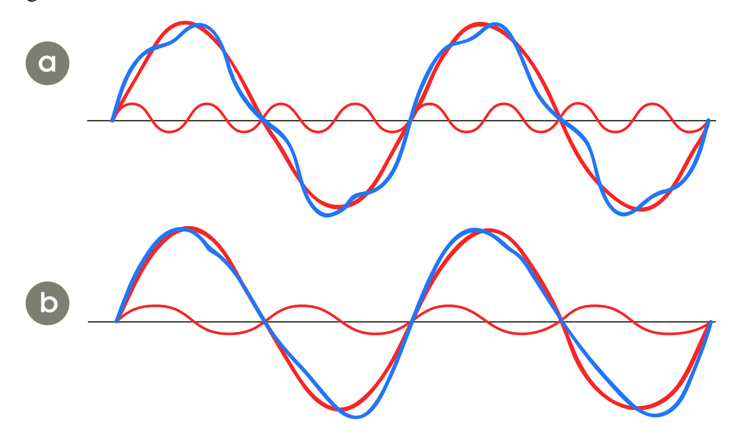
1.3.3 Timbre

El timbre es la cualidad del sonido que nos permite identificar el foco que lo emite. Por ejemplo, un diapasón, un violín, una flauta y un gong pueden emitir la misma nota musical, pero al comparar su registro gráfico, es fácil distinguir cuál instrumento es el que la emite, como se observa en la siguiente figura.



Cuando se analiza el registro de dos o más ondas sonoras con la misma amplitud y frecuencia, se puede concluir que la forma de la onda resulta de la interferencia de las ondas.

En la siguiente figura, se muestra la superposición de dos ondas que generan una tercera.



La onda de mayor amplitud se denomina onda predominante y tiene la misma amplitud que la onda resultante. Las frecuencias de las ondas de menor amplitud son múltiplos enteros de la frecuencia de la predominante. La onda resultante en a y en b tiene la misma frecuencia y amplitud pero diferente forma.

En 1822, Joseph Fourier descubrió que todo movimiento periódico por complejo que sea, se puede descomponer en senoides sencillas de distintas amplitudes y frecuencias. Así, es posible encontrar las senoides que, al sumarse o interferir, forman el tono de cualquier instrumento. El oído humano hace un "análisis automático de Fourier", ya que al escuchar una orquesta es capaz de discriminar los sonidos fuertes de los débiles, los sonidos agudos de los graves y, a la vez, producir la interferencia de ellos.

1.4 Pulsaciones

Cuando dos tonos ligeramente diferentes en su frecuencia suenan al unísono, se presenta una fluctuación en la intensidad de los sonidos, es decir que el sonido es intenso, luego débil, después intenso, etc. A este fenómeno de interferencia se le conoce como pulsación o trémolo.



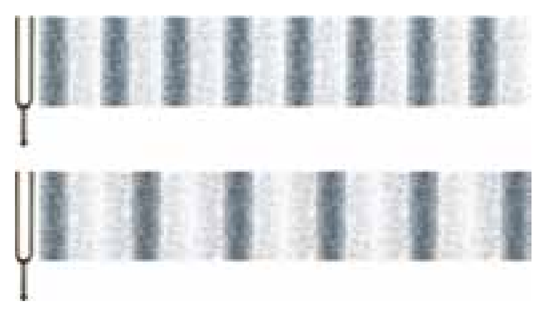
EJERCICIO

¿Por qué el sonido del violín es diferente al de la flauta así produzca la misma nota?



Figura 3. El sonido percibido por una persona, cambia de acuerdo con el movimiento de la fuente sonora.

Consideremos la producción de pulsaciones mediante dos diapasones de la misma frecuencia pero desafinados. La siguiente figura muestra el comportamiento de las compresiones y rarefacciones del aire al golpear los diapasones.



En la gráfica se puede observar que los instrumentos:

- Están en fase cuando se superponen dos compresiones, y se produce una intensidad máxima.
- Están en desfase cuando se superpone una compresión con un enrarecimiento y se produce una intensidad mínima.

Para afinar un instrumento se hace vibrar al unísono con el sonido patrón; cuando las pulsaciones desaparezcan se considerará afinado el instrumento.

1.5 Efecto Doppler

Seguramente has oído pasar un auto a toda velocidad junto a ti cuando estás parado al borde de la calle (figura 3). ¿Qué ocurre con el sonido del motor? Cuando el auto se aproxima, el sonido es más agudo que cuando se aleja, pero la persona que viaja en el automóvil siempre oye el mismo sonido.

Este efecto ocurre porque una fuente de ondas se mueve respecto a un observador, mientras que el medio en que se propaga la onda, se encuentra en reposo con respecto al observador. El observador percibe la onda irradiada por la fuente con una frecuencia diferente a la emitida. Este fenómeno se denomina efecto Doppler, en honor a su descubridor, el físico y matemático austriaco Christian Doppler (1803-1850).

Definición

Al cambio de frecuencia de las ondas debido al movimiento relativo entre la fuente y el observador se le llama efecto Doppler.

El siguiente análisis permite encontrar la relación exacta entre la frecuencia emitida por la fuente y el observador:

- Si el observador está en reposo y la fuente, que se acerca a él emite una señal, esta será percibida por el observador con una mayor frecuencia que la emitida. Entonces, la frecuencia percibida por el observador se expresa como:

$$f_0 = \frac{v}{v + v_f} f_f$$

Donde f_0 es la frecuencia que percibe el observador, v es la velocidad de la onda, v_f es la velocidad de la fuente y f_f es la frecuencia con la que la fuente emite las ondas.

- Si el observador se encuentra en reposo y la fuente se aleja de él, la señal emitida por la fuente se percibe con una menor frecuencia, es decir, esta será percibida por el observador con una menor frecuencia que la emitida, es decir:

$$f_0 = \frac{v}{v + v_f} f_f$$

- Si la fuente que emite la señal se encuentra en reposo y el observador se acerca a ella, la frecuencia de la señal emitida se percibe con mayor intensidad, por tanto:

$$f_0 = \frac{v + v_0}{v} f_f$$

- Si la fuente se encuentra en reposo y el observador se aleja de ella, la señal emitida por la fuente será percibida con una menor frecuencia, entonces:

$$f_0 = \frac{v - v_0}{v} f_f$$

Veamos algunas aplicaciones del efecto Doppler: los agentes del tránsito usan radares que son aparatos que emiten señales de radio cuya frecuencia es f. Al cruzar un vehículo y alejarse de ellos, le disparan las ondas de radio; el vehículo las recibe con una frecuencia f_1 menor que f. Las ondas se reflejan y ahora el vehículo se convierte en la fuente cuya frecuencia de las ondas es f_1, cuando la señal regresa a los agentes, ellos se convierten en observadores, la reciben con una frecuencia f_2 menor que f_1. La señal reflejada la recibe un sensor y por medio de las aplicaciones sucesivas del efecto Doppler, el computador calcula la velocidad de vehículo y los agentes determinan si esta excede o no el límite permitido.

El efecto Doppler también se utiliza para calcular la velocidad de las galaxias, respecto a la tierra, a través del análisis de las frecuencias, si hay corrimiento a frecuencias menores (al rojo) la galaxia se aleja de nosotros y si el corrimiento es a frecuencias mayores (al azul) la galaxia se acerca.

Otro uso del efecto Doppler es cuando se aplica a ultrasonidos reflejados sobre el feto. De esta manera los médicos visualizan el movimiento cardiaco, el flujo sanguíneo y los latidos del corazón del feto.

Una aplicación del efecto Doppler se observa cuando la velocidad de la fuente es igual a la velocidad de propagación de la onda. Cada vez que se emite un pulso este es producido sobre el frente de la onda anterior, pues la fuente va con la onda. Los aviones que viajan a la velocidad del sonido se llaman sónicos y el apilamiento de las crestas sobre las alas perturba el flujo del aire dificultando el control de la nave.

Cuando la velocidad de la fuente es mayor que la de la onda, cada vez que la fuente emite un pulso lo hace delante del frente de la onda anterior, la fuente le gana a la onda. Las ondas se interfieren constructivamente en las orillas y tienen forma de V; se le llama onda de proa y pareciera que es arrastrada, igual que sucede con una lancha rápida. Los aviones que viajan más rápido que el sonido se llaman supersónicos y generan una onda de choque que es como la de proa, pero en forma tridimensional; aquí se traslapan las esferas y forman un cono, cuya intensidad es grande por la interferencia constructiva. El avión vuela en forma constante y no perturbada. La figura 4 señala el impacto de la onda sonora en el observador, O', en tierra. Este percibe un estallido en un corto tiempo, diferente al sonido producido por un avión subsónico que es un ruido prolongado y continuo.

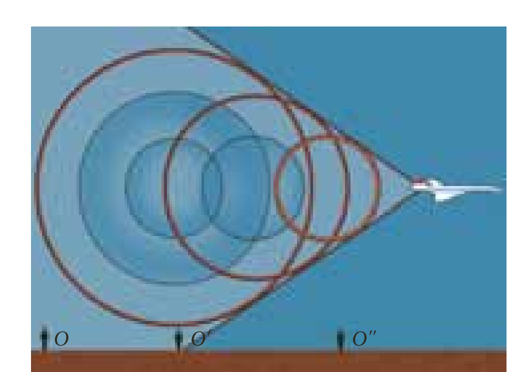


Figura 4. Un avión supersónico genera una onda tridimensional con forma de cono, cuyo impacto en el observador O' es un estallido en corto tiempo.

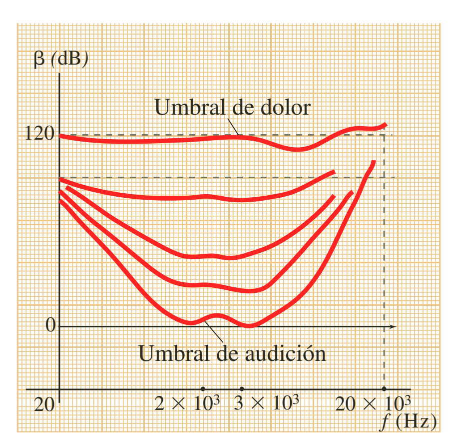
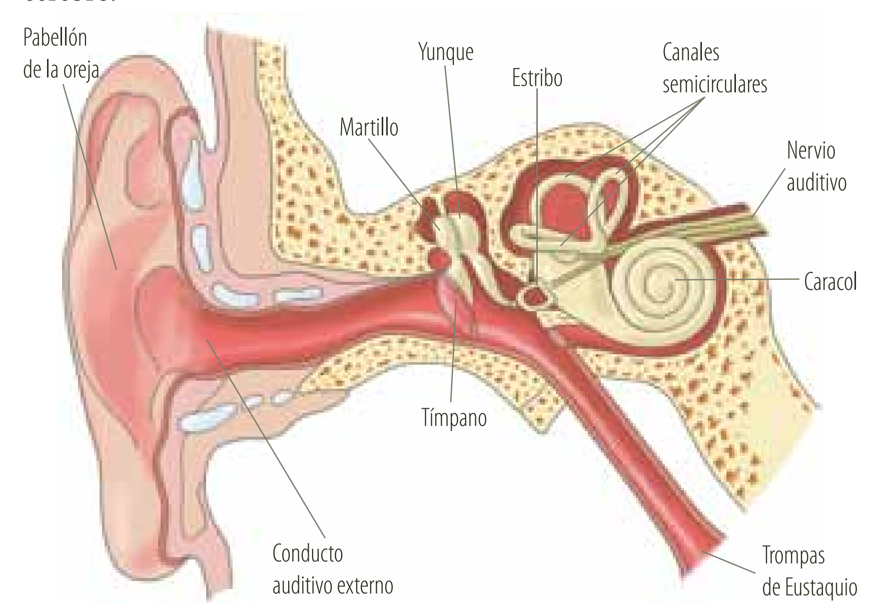


Figura 5. Gráfica de frecuencias audibles para el oído humano.

1.6 El oído y la audición

El oído es un órgano de gran importancia para el estudio del sonido, ya que allí es donde se da inicio a la sensación acústica que procesa el cerebro.



El funcionamiento del oído inicia cuando el sonido es captado por el pabellón de la oreja que tiene la forma adecuada para brindar una mayor superficie de recepción, pasa por el conducto auditivo externo, donde concentra las ondas, y las lleva al tímpano. Como el tímpano está tensado, vibra lentamente con los tonos bajos y rápidamente, con los tonos altos; luego, en el oído medio se amplifica la vibración producida en el tímpano, gracias a los tres huesecilllos (martillo, yunque y estribo). La vibración se transmite a la ventana oval del oído interno. Como esta ventana es 30 veces menor que el tímpano, se produce un aumento de presión.

En el oído interno que está lleno de líquido, la fuerza que el estribo ejerce sobre la ventana oval del caracol se convierte en ondas de presión hidráulica, que dentro del caracol, se transforman en impulsos nerviosos y, finalmente, se transmiten al cerebro por medio del nervio acústico. El cerebro procesa e interpreta esa información como sonidos identificables y localizables.

Cuando el oído se expone a un ruido muy intenso se contraen dos grupos de músculos, uno de ellos limita la capacidad de vibrar del martillo y el otro aleja el estribo de la ventana oval. Este proceso tarda 50 milisegundos por lo que no puede proteger al oído contra cambios violentos de volumen. Los sonidos de muy alta frecuencia causan pérdida de sensibilidad auditiva porque dañan las células del oído interno, las cuales no se regeneran.

El ser humano puede percibir frecuencias que van de 20 Hz (vibraciones por segundo) a 20.000 Hz. La percepción del sonido más sensible es de una frecuencia cercana a los 3.000 Hz. En la figura 5, se puede observar el intervalo de frecuencias audibles para cada intensidad sonora percibida por el oído. A los niveles mínimos de intensidad que el oído capta, se les llama **umbral de audición** y a los niveles máximos de audición se les llama **umbral de dolor**.

EJERCICIO

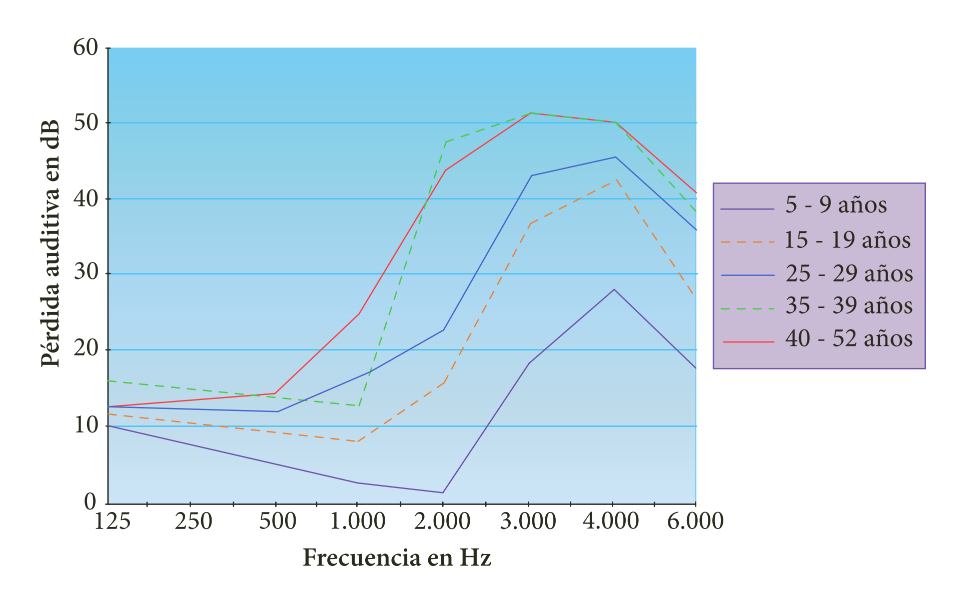
¿Por qué no podemos oír todos los sonidos? Explica.



La capacidad auditiva se va deteriorando con la edad. La mayoría de la gente de 30 años o más no oye frecuencias de más de 15.000 Hz, a los 50 años el límite desciende a los 12.000 Hz y a los 70 años baja a 6.000 Hz, es decir, por debajo del límite superior de la conversación normal.

Estudios audiométricos realizados a personas que han sido sometidas a altos niveles de ruido, durante largo tiempo, revelan una pérdida de agudeza auditiva en frecuencias altas (entre 3.000 Hz y 6.000 Hz) y, en particular, alrededor de los 4.000 Hz. La pérdida se amplía con el tiempo hasta afectar frecuencias entre los 500 Hz y los 2.000 Hz.

En la siguiente figura se observan los resultados del efecto causado por la exposición prolongada de una persona al ruido en función del tiempo de exposición, tomando como referencia un nivel medio de 99 dB.



Pero ¿cómo afecta esta pérdida nuestra calidad de vida? La exposición continua a sonidos muy intensos, a muy alto volumen, tiene el mismo efecto en el oído que el envejecimiento en la piel, debido a que la capacidad auditiva disminuye por la exposición prolongada a un sonido generado muy cerca del oído.

Los efectos causados por esta exposición son de tipo fisiológico y psicológico.

- Entre los primeros, el más común es la ruptura del tímpano por ruidos muy intensos, como las explosiones.
- Los de índole psicológico pueden ir desde el insomnio y una conducta irritable temporal, hasta una alteración permanente de la conducta, la cual requiere atención médica.

Actualmente muchas personas jóvenes tienen la misma pérdida de la capacidad auditiva que la de un adulto de 50 años, debido al uso de los Ipod, MP3, MP4, walkman y otros aparatos con audiófonos personales.

Ahora, imagina la dificultad que supone el no oír. Un niño con audición normal pasa naturalmente de oír las palabras a decirlas y luego, a reconocer sus representaciones escritas. Cada paso se le facilita por lo aprendido anteriormente. En cambio, un niño con problemas auditivos no tiene el estímulo del sonido del lenguaje, lo cual implica una lucha constante por aprender.

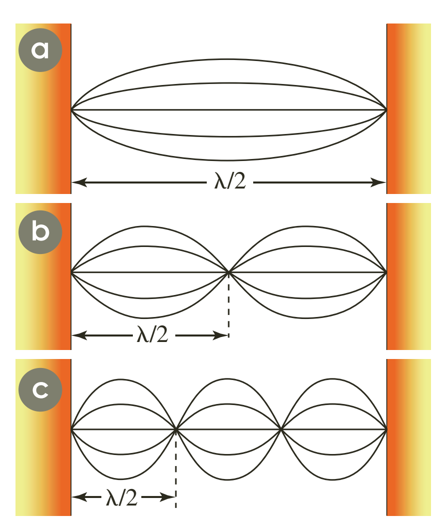


Figura 6. Relación entre la longitud de la cuerda y la longitud de la onda al duplicar y al triplicar la frecuencia.

2. Sistemas resonantes

2.1 Cuerdas

El sonido se produce cuando algo se mueve de un lado a otro con suficiente rapidez para enviar una onda a través del medio en que se está moviendo. En este caso, decimos que el objeto vibra. En los instrumentos musicales el sonido se produce por vibración. En el violín, por ejemplo, vibran las cuerdas; en la flauta vibra la columna de aire que está dentro del tubo del instrumento; y en los tambores, lo que vibra es la membrana sólida.

Para producir los sonidos musicales es necesario tener una caja de resonancia, donde las partículas del aire vibren con mayor amplitud que la vibración original. Cuando una cuerda vibra, la caja de resonancia también lo hace y como esta tiene mayor superficie de contacto con el aire, puede producir una onda sonora mayor.

Si se produce una onda estacionaria con dos nodos (figura 6a) y luego se duplica la frecuencia, se obtiene una con tres nodos, es decir, dos vientres (figura 6b). Al triplicarla se obtienen cuatro nodos, tres vientres (figura 6c). Podemos concluir entonces que, para una cuerda de longitud l, el valor de dicha longitud es un múltiplo entero de la mitad de la longitud de onda, expresado como:

$$l = n\,\frac{\lambda_n}{2}$$

Donde n es un número entero positivo y equivale al número de vientres de la onda estacionaria; si λ_n es la longitud de la onda estacionaria que se produjo según cada configuración, entonces:

$$\lambda_n = \frac{2l}{n}$$

Como,

$$f = \frac{v}{\lambda}$$

Entonces,

$$f_n = \frac{n \cdot v}{2l}$$

La expresión anterior nos indica las frecuencias para las cuales se producen ondas estacionarias en una cuerda y forman la escala armónica. De tal forma que si $n = 1$, la cuerda resuena en su frecuencia fundamental o primer armónico, si $n = 2$, se produce el segundo armónico y así sucesivamente.

La ecuación de la frecuencia para ondas estacionarias es válida para una cuerda sometida a una tensión y material específicos que determinan el valor de la velocidad. En la unidad anterior se determinó que la velocidad de la onda en una cuerda es:

$$v = \sqrt{\frac{F_T}{\mu}}$$

Entonces, para calcular la frecuencia f_n, con que vibra una cuerda, tenemos que:

$$f_n = \frac{n}{2l}\sqrt{\frac{F_T}{\mu}}$$

2.2 Tubos sonoros

En los instrumentos de viento tales como la flauta, la quena y el clarinete, o de metal como el trombón, se pueden provocar ondas estacionarias al hacer vibrar las moléculas de aire que están dentro de su cavidad o tubo sonoro.

Definición

Un tubo sonoro es un tubo largo y delgado cuya columna de aire contenida resuena según una vibración particular que recibe desde la parte abierta del tubo.

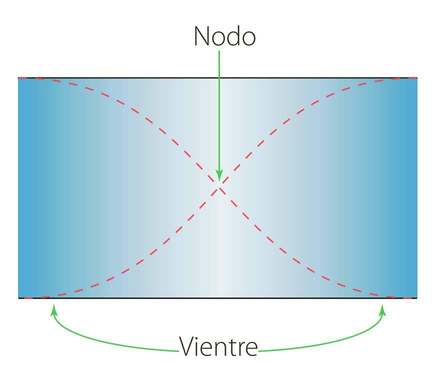
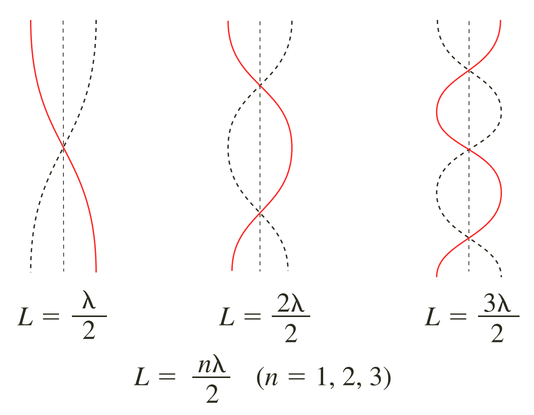


Figura 7. Formación de ondas estacionarias en tubos sonoros, por las interferencias de las reflexiones de la onda con las paredes del tubo.

Una vez se produzca la vibración por medio de los labios o por medio de la lengüeta del instrumento, la onda sonora sufre reflexiones con las paredes del tubo y se producen interferencias formando ondas estacionarias, de tal forma que en sitios específicos del tubo siempre se forman rarefacciones de aire, es decir, los nodos, y en otros, compresiones de aire, es decir, los valles, figura 7. Existen dos clases de tubos sonoros, los tubos abiertos y los tubos cerrados.

Tubos abiertos

Los tubos abiertos son tubos sonoros cuyos extremos son abiertos. Aunque en un tubo abierto las ondas son longitudinales, se representan como se observa en la siguiente figura, para describir con mayor claridad dónde se encuentran los nodos y dónde los vientres.



Como la distancia de un nodo a otro es la mitad de la longitud de onda (λ_n) de la onda estacionaria, la longitud del tubo se expresa como:

$$L = \frac{n \cdot \lambda_n}{2}$$

Donde n es un número entero positivo, por tanto λ_n es:

$$\lambda_n = \frac{2L}{n}$$

Siendo la frecuencia para valores positivos de n igual a:

$$f_n = \frac{n \cdot v}{2L}$$

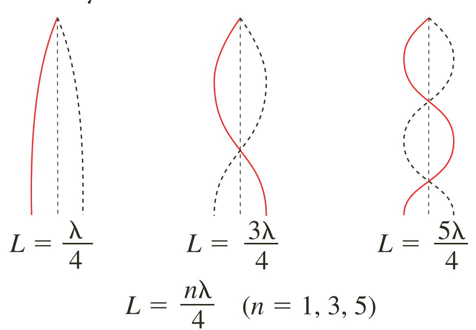
Las diferentes frecuencias de las ondas estacionarias se denominan **armónicos**, al igual que en las cuerdas. La frecuencia de cada armónico depende de la velocidad del sonido y de la longitud del tubo. Por ejemplo, en una flauta las longitudes del tubo pueden variar por cada agujero dispuesto a lo largo del tubo. El flautín tiene el mismo mecanismo solo que las ondas son generadas por la lengüeta en la boquilla.

EJERCICIO

Calcula la frecuencia de los tres primeros sonidos de un tubo sonoro cerrado de 40 cm de longitud si la temperatura es de 15 °C.

Tubos cerrados

Los tubos cerrados son aquellos tubos sonoros con un extremo abierto y el otro cerrado. En la siguiente figura se representan los diferentes armónicos formados por los tubos cerrados, en los cuales se produce un nodo en el extremo cerrado y un vientre en el extremo abierto.



$$L = \frac{n\lambda}{4} \quad (n = 1, 3, 5)$$

El primer armónico es un cuarto de la longitud de la onda estacionaria $\left(\frac{\lambda_n}{4}\right)$, el segundo armónico es $\frac{3\lambda_n}{4}$, el tercer armónico es $\frac{5\lambda_n}{4}$ y así sucesivamente, luego la longitud del tubo cerrado se expresa como:

$$L = \frac{n \cdot \lambda_n}{4}$$

Siendo n es un número impar positivo ($n = 1, 3, 5, ...$), en donde λ_n es:

$$\lambda_n = \frac{4L}{n}$$

y f_n para n impar positivo igual a:

$$f_n = \frac{n \cdot v}{4L}$$

EJEMPLO

En una flauta, el vientre no está justo en la boquilla pero está cercano a ella. El tono más bajo (grave) de la flauta es de 262 Hz y se logra al tapar todos los agujeros. Determinar:

a. ¿Cuál es la distancia aproximada desde la boquilla al extremo de la flauta, si la temperatura es de18 °C?

b. ¿Cuál es la frecuencia del primer armónico si la temperatura se eleva a 30 °C?

Solución:

a. La velocidad del sonido a 18 °C es:

$v = 331 \text{ m/s} + 0{,}6 \text{ m/s} \cdot T \cdot °C^{-1}$

$v = 331 \text{ m/s} + 0{,}6 \text{ m/s} \cdot 18 °C \cdot °C^{-1}$ *Al remplazar*

$v = 341{,}8 \text{ m/s}$ *Al calcular*

Como la flauta es un tubo abierto, la frecuencia en el primer armónico es:

$f_n = \frac{n \cdot v}{2L}$

$L = \frac{n \cdot v}{2 \cdot f_n}$ *Al despejar L*

$L = \frac{1 \cdot 341{,}8 \text{ m/s}}{2 \cdot 262 \text{ s}^{-1}}$ *Al remplazar*

$L = 0{,}65 \text{ m}$ *Al calcular*

La distancia entre la boquilla y la columna es aproximadamente 65 cm.

b. La velocidad del sonido a 30 °C es:

$v = 331 \text{ m/s} + 0{,}6 \text{ m/s} \cdot \text{T} \cdot °\text{C}^{-1}$

$v = 349 \text{ m/s}$ *Al remplazar y calcular*

Entonces la frecuencia en el primer armónico es:

$$f_n = \frac{n \cdot v}{2L}$$

$$f_n = \frac{1 \cdot 349 \text{ m/s}}{2 \cdot 0{,}65 \text{ m}}$$ *Al remplazar*

$f_n = 268{,}5 \text{ Hz}$ *Al calcular*

A 30 °C el primer armónico de la flauta es de 268,5 Hz.



Figura 8. La voz se forma cuando el aire hace vibrar las cuerdas vocales.

2.3 La voz

En el hombre la voz se forma por ondas sonoras producidas en la laringe que al atravesar las cuerdas vocales las hace vibrar. El pecho, la garganta y la cavidad de la boca hacen el papel de resonador.

La producción del habla se puede considerar en las dos etapas siguientes:

- **Producción del sonido audible**: en esta etapa el aire es expulsado desde los pulmones, asciende por la tráquea y sale por la nariz y por la boca. El flujo de aire es controlado por las cuerdas vocales (cartílagos ubicados entre la tráquea y la faringe).

  Cuando se quiere emitir un sonido, el aire procedente de los pulmones es forzado a través de la glotis durante la espiración y hace vibrar las cuerdas vocales; luego, la presión del aire aumenta debajo de las cuerdas, el aire pasa a través de ellas, se reduce la presión, las cuerdas se cierran y comienza el proceso. Se genera así una serie de vibraciones cuya frecuencia depende de la tensión y de la masa de las cuerdas. En esta fase se producen ondas periódicas compuestas por varios armónicos con amplitudes aproximadamente iguales.

- **Articulación del sonido para producir el fonema**: la articulación tiene lugar en la faringe y en las cavidades oral y nasal. El tamaño y la forma de estas cavidades se controlan por medio de la posición de la lengua, los labios y el velo del paladar: para cada tamaño y forma, la cavidad resuena a diferentes frecuencias. Aunque ninguno de los armónicos producidos por las cuerdas vocales tenga frecuencia igual a una de las frecuencias características de la cavidad, esta resuena a frecuencias cercanas. Este hecho determina el timbre de la voz de cada persona.

  Debido a que los sonidos producidos por las cuerdas vocales son muy débiles, es necesario amplificarlos. En esta parte intervienen los resonadores nasal, bucal y faríngeo, los cuales aumentan la frecuencia de algunos sonidos y disminuyen la de otros. Una vez sale el sonido de los resonadores, es acoplado por los articuladores (paladar, lengua, dientes, labios y glotis) quienes al adquirir determinadas posiciones trasforman el sonido en palabras, frases, etc.

  Por ejemplo, en la producción de los fonemas vocálicos es necesario tener en cuenta el grado de la abertura y la posición de los articuladores. De este modo, al mantener la lengua totalmente separada del paladar y ubicada en la parte central es posible producir la vocal a; o al ubicar la lengua muy cerca del paladar y próxima a la región delantera del paladar la vocal u, y así sucesivamente. Un proceso similar ocurre en la producción de los fonemas consonánticos.





Interpreta

1 Relaciona cada definición con su concepto.

a. Ondas que tienen un aumento de presión y, luego, una disminución que se propaga a las demás regiones del medio.

b. Característica que permite diferenciar los sonidos graves de los agudos.

c. Característica que permite diferenciar los sonidos fuertes de los débiles.

d. Unidad de medida utilizada para medir la intensidad del sonido.

e. Característica para distinguir los sonidos emitidos por dos fuentes aún si tienen otras características idénticas.

f. Ondas que se forman alineándose para generar un sonido mayor.

☐ Intensidad.	☐ Ondas de presión.
☐ Decibeles.	☐ Ondas de choque.
☐ Timbre.	☐ Tono.

2 Establece diferencias entre:

a. Tubos abiertos y tubos cerrados.

b. Frecuencia fundamental y segundo armónico.

c. Onda predominante y onda de choque.

d. Reverberación e intensidad del sonido.

e. Umbral de dolor y umbral de audición.

3 Di cuáles son los límites de intensidad sonora audibles para las personas, a las siguientes frecuencias.

a. 32 Hz
b. 128 Hz
c. 512 Hz
d. 2.048 Hz
e. 4.096 Hz
f. 8.192 Hz

4 Ordena de menor a mayor los diferentes medios según la propagación del sonido en ellos. Explica tu respuesta.

a. Metal.
b. Aire frío.
c. Aire caliente.
d. Arena.

5 Dos cuerdas de 80 cm de longitud y densidad longitudinal de masa es 0,0045 kg/m están sometidas a tensiones de 180 N y 200 N, respectivamente. ¿Cuál es la frecuencia de las pulsaciones producidas al hacerlas vibrar simultáneamente en su frecuencia fundamental?

Argumenta

6 Escribe cuatro ejemplos de trabajadores que deben extremar las medidas de protección para evitar los problemas derivados de la contaminación acústica.

7 Responde. ¿Cómo se explica que, al caer al suelo, distintos cuerpos emitan sonidos diferentes?

8 Responde. ¿Puede una onda sonora anular a otra? Explica tu respuesta.

Responde las preguntas 9 y 10 de acuerdo con la siguiente lectura.



La **ecolocalización** es un sistema por el cual algunos animales, como murciélagos y delfines, emiten vibraciones sonoras para comunicarse con el mundo que los rodea. El eco del sonido emitido les permite determinar la posición en que se produjo la reflexión. Para ecolocalizar presas pequeñas, es necesario usar ondas cuya longitud sea igual o más pequeña que estas. Por ello, los animales que emplean este método de orientación emiten sonidos de alta frecuencia. El tipo de sonido emitido varía según la especie, pero tiene un rango de frecuencias que va desde 30.000 Hz hasta 90.000 Hz. Las frecuencias altas son útiles para localizar objetos cercanos y evitar obstáculos.

9 Responde. ¿Por qué los seres humanos no emitimos ni percibimos ultrasonidos? Explica tu respuesta.

10 En los últimos años los científicos han estudiado la forma de ayudar a las personas ciegas por medio de la ecolocalización. ¿Cómo podría concretarse esta ayuda?

Propone

11 ¿Cuáles son las posibles consecuencias de la exposición al ruido excesivo?

Según estudios hechos por entidades dedicadas a investigar la contaminación auditiva, la mitad de los jóvenes entre los 18 y 27 años presentan algún tipo de discapacidad auditiva, normalmente por el uso excesivo de audífonos y el ruido de conciertos o discotecas.

- ¿Qué propondrías para evitar este tipo de daños al oído?

Actividades

Verifica conceptos

1 Escribe V, si la afirmación es verdadera o F, si es falsa. Justifica tu respuesta.

- ☐ El sonido es una onda longitudinal y mecánica.
- ☐ Cuando la temperatura aumenta la rapidez de las moléculas disminuye.
- ☐ Al disminuir la densidad del medio de propagación de la onda, la velocidad de propagación de la onda disminuye.
- ☐ El ser humano percibe sonidos que están en frecuencias entre 20 Hz y 20.000 Hz.
- ☐ El nivel de intensidad del sonido depende de la mínima intensidad audible por el ser humano.
- ☐ La variación de la intensidad del sonido tiene una relación directamente proporcional con la superficie donde se propaga el sonido.
- ☐ La frecuencia de las ondas sonoras depende del movimiento relativo que tiene la fuente sonora o el observador.

Subraya la respuesta correcta en las preguntas 2 a 4.

2 El eco de un sonido depende de:

a. La interferencia.
b. La reflexión.
c. La difracción.
d. La refracción.

3 La velocidad de propagación de un sonido depende de:

a. La compresibilidad.
b. El tono.
c. La intensidad.
d. El timbre.

4 La rarefacción del aire ocurre:

a. Cuando su temperatura aumenta.
b. Cuando la presión del aire aumenta.
c. Cuando disminuye la densidad del aire.
d. Cuando su temperatura y presión disminuyen.

5 Completa las siguientes afirmaciones.

a. Cuando la masa ____________ en los gases es menor, la rapidez de propagación del sonido ____________.

b. El ____________ o altura del sonido es la característica que hace referencia a los sonidos altos o ____________ y bajos o ____________.

c. Dos pulsaciones están en fase cuando se ____________ dos compresiones, y se produce una intensidad ____________.

d. El funcionamiento del oído inicia cuando el sonido es captado por ____________ de la oreja y luego pasan por el ____________ donde se concentran las ondas y son llevadas al ____________.

Analiza y resuelve

6 Si una trompeta y un piano suenan afinados a una temperatura de 16 °C, ¿seguirán estándolo a 30 °C?

7 Si apoyas firmemente un diapasón contra una mesa de madera, el sonido se hace más intenso. ¿Por qué sucede este fenómeno? ¿Cómo afecta esta situación al tiempo durante el cual puede vibrar el diapasón? Explica este fenómeno usando la ley de conservación de la energía.

8 Javier estudia las ondas sonoras con una experiencia. Ubica un parlante que emite sonidos de 200 Hz, como muestra la figura. Explica qué ocurre con el aire que está entre Javier y el parlante. ¿Por qué Javier recibe sonido en ambos oídos?

9 Cuando un instrumento suena, ¿sus vibraciones producen ondas sonoras? Explica tu respuesta.

10 Representa cómo imaginas las ondas sonoras producidas por cada uno de los siguientes instrumentos. ¿Son iguales? Justifica tu respuesta.

A

B

C

D

Actividades

Problemas básicos

11 **Calcula la distancia a la que se produce una tormenta, si un trueno se escucha 4 segundos después de haber visto el rayo. Considera la velocidad del sonido como 340 m/s.**

12 **Al dejar caer una piedra en un pozo, se escucha 4 s después el sonido que produce al chocar contra la superficie del agua. ¿A qué profundidad está la superficie del agua del pozo?**

13 **Un avión vuela sobre nosotros y el sonido tarda 5 s en llegar a nuestros oídos. ¿A qué distancia horizontal se encontrará el avión cuando escuchemos el sonido?**

14 **Una persona parada frente a una montaña emite un grito y observa que su eco se escucha 2 s después de haber gritado. Calcula la distancia entre la persona y la montaña. ¿Se percibe el mismo fenómeno si la montaña se encuentra situada a 10 m?**

15 **La velocidad del sonido en el aire es de 340 m/s y en el agua, 1.240 m/s. Calcula la longitud de onda de una vibración a una frecuencia de 256 Hz cuando se propaga en:**

a el aire.

b. el agua.

16 **Dos personas están situadas a una distancia de 1,1 km. Una de ellas hace explotar un petardo y la otra mide el tiempo transcurrido, que resulta ser de 3 s.**

a. Calcula el tiempo que tarda el sonido en recorrer la distancia entre ambas personas y compáralo con el dato del enunciado.

b. Razona si durante el desarrollo de la experiencia sopla viento a favor o en contra.

17 **La onda acústica generada por una sirena de los bomberos tiene una frecuencia de 3.600 Hz. Calcula:**

a. La velocidad de propagación.

b. El período.

c. Responde. ¿Originan algún tipo de contaminación las sirenas?

18 **El sonar de un barco emite señales que tardan 2 s desde que se emiten hasta que rebotan en un grupo de peces y retorna al barco. Si la velocidad del sonido en el agua es 5.200 km/h, ¿a qué distancia se encuentran los peces?**

19 **Algunos animales como los perros y los delfines pueden percibir sonidos muy agudos de hasta 100.000 Hz de frecuencia. Calcula:**

a. El período de ese sonido.

b. La longitud de onda.

20 **Halla la longitud de onda de un sonido en el aire a 20 °C, si se sabe que su frecuencia es 10.000 Hz.**

21 **Un sonar emite en el agua del mar una serie de ultrasonidos cuya frecuencia es de 40.000 Hz. Si sabemos que la temperatura del agua es de 0 °C, calcula la longitud de onda de los ultrasonidos.**

22 **El oído humano no percibe todos los sonidos; solo los que poseen frecuencias comprendidas entre 20 Hz y 20.000 Hz.**

a. ¿Cómo se denominan los sonidos con frecuencias superiores?

b. ¿Qué aplicaciones tienen este tipo de sonidos?

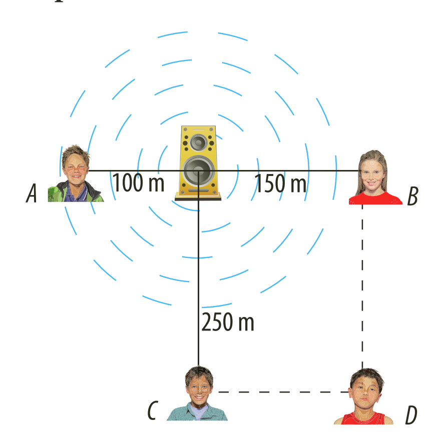
c. Calcula las longitudes de onda en las que el oído humano no percibe el sonido.

23 **Un excursionista grita frente a un precipicio de 680 m de profundidad.**

a. ¿Cuánto tiempo tarda en escuchar el eco?

b. Si grita en un día caluroso, ¿tardará más o menos tiempo en escuchar el eco?

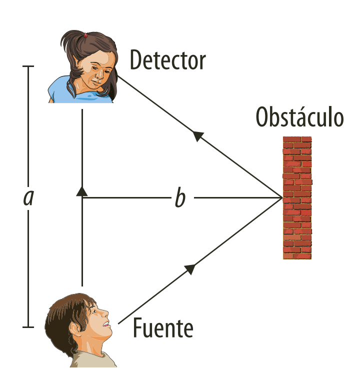
24 **Los observadores *A*, *B*, *C* y *D* se encuentran a diferentes distancias de una fuente sonora de 25.000 W, como se muestra en la figura. ¿Cuál es la intensidad con la que cada observador percibe el sonido producido?**





Problemas de profundización

25 **En la figura se muestra una situación en la cual una fuente de ondas sonoras se halla a una distancia a de un detector de sonido.** A la derecha de la fuente y el detector se encuentra un obstáculo, que refleja el sonido emitido por la fuente, de manera que el detector registra una mezcla de dos ondas en un momento dado, una proviene directamente de la fuente y otra reflejada desde el obstáculo produciendo interferencia constructiva cuando la diferencia de caminos sea λ. De acuerdo con la anterior información, ¿a qué distancia b debe ubicarse el obstáculo para que las ondas directas y reflejadas lleguen al detector en fase si $a = \lambda$?



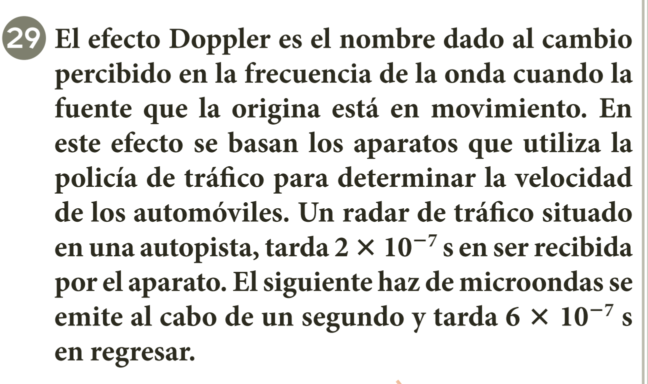
26 **En un concierto de rock hay 45.000 aficionados gritando las canciones de su banda preferida. Cada aficionado puede producir una potencia promedio de 900 W. Si la distancia promedio al centro del escenario es de 100 m, ¿cuál será la intensidad del sonido en el centro del estadio?**

27 **Una persona se siente perturbada al escuchar un fuerte sonido debido a un disparo. Si el nivel de intensidad del sonido es de 110 dB y el sonido del disparo tiene una potencia de 1,5 W, halla:**

a. La intensidad del sonido.

b. La distancia a la que se encuentra la persona del lugar donde se hizo el disparo.

28 **Dos conductores que viajan en tractomulas se encuentran en la vía que conduce de Bogotá a Cartagena. Los dos van en direcciones opuestas; el que viaja de Bogotá a Cartagena viaja a 90 km/h y el que viaja de Cartagena a Bogotá lo hace a 50 km/h y se encuentran en una recta a 200 m uno del otro. Si en ese instante tocan la bocina simultáneamente con una frecuencia de 900 Hz, ¿cuál es la frecuencia que percibe cada conductor cuando escucha la bocina de la otra tractomula?**



29 **El efecto Doppler es el nombre dado al cambio percibido en la frecuencia de la onda cuando la fuente que la origina está en movimiento. En este efecto se basan los aparatos que utiliza la policía de tráfico para determinar la velocidad de los automóviles. Un radar de tráfico situado en una autopista, tarda 2×10^{-7} s en ser recibida por el aparato. El siguiente haz de microondas se emite al cabo de un segundo y tarda 6×10^{-7} s en regresar.**



Contesta:

a. ¿A qué distancia se encuentra el automóvil cuando le llega primero la onda?

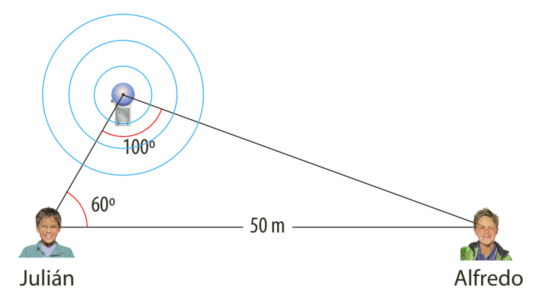
b. ¿A qué distancia llega la segunda onda?

c. ¿Cuál es la velocidad del carro?

Toma la velocidad de la microonda como:

3×10^{8} m/s.

30 **Dos estudiantes, Alfredo y Julián, se encuentran con respecto al timbre de salida como se muestra en la figura. Si el timbre del colegio emite un sonido con una potencia de 10.000 W, ¿cuál es la intensidad del sonido que experimenta cada estudiante debido al sonido del timbre? ¿Cuál es el nivel de intensidad del sonido experimentado por cada estudiante?**



31 **Un automóvil con una velocidad constante de 72 km/h se aproxima a un observador que está parado en el andén. Si el auto hace sonar la bocina con una frecuencia de 720 Hz y se sabe que la velocidad del sonido en el aire es de 340 m/s, ¿qué frecuencia percibe el observador?**



Actividades

Verifica conceptos

1 **Escribe V, si la afirmación es verdadera o F, si es falsa. Justifica tu respuesta.**

- ☐ El sonido se produce gracias a la vibración de los objetos.
- ☐ La frecuencia en una cuerda aumenta cuando la longitud de la cuerda aumenta, manteniendo la velocidad de propagación constante.
- ☐ En los extremos de un tubo abierto se generan los vientres de la onda.
- ☐ La voz se forma por ondas sonoras producidas en la tráquea.
- ☐ La reverberación impide escuchar de forma nítida los sonidos.
- ☐ Si en un tubo cerrado se generan tres vientres en la onda, hay tres nodos.
- ☐ La frecuencia de los sonidos producidos por dos tubos de igual longitud, uno abierto y el otro cerrado, es la misma.

2 **Completa cada uno de los siguientes enunciados.**

a. Los instrumentos como la flauta y el ________ ________ provocan ondas ____________ al hacer vibrar las moléculas de aire.

b. Las diferentes frecuencias de las ____________ estacionarias se denominan ____________.

c. Si se desea emitir un sonido, el aire que proviene de los ____________ es forzado a través de la ____________ haciendo vibrar las ____________ vocales.

d. La articulación del sonido se da en la ______ __________ y en las cavidades ____________ y ____________.

e. En un tubo sonoro la columna de aire ________ ____________ según una ____________ que recibe desde la parte ____________ del tubo.

Elige la respuesta correcta.

3 **Los sonidos son producidos por:**

a. La tráquea.
b. Las cuerdas vocales.
c. La laringe.
d. La garganta.

Analiza y resuelve

4 **Un silenciador es un artefacto que permite reducir el ruido que puede hacer un objeto cuando está en funcionamiento. Por ejemplo, en los vehículos el mecanismo funciona gracias a dos conductos diferentes por donde viaja el sonido para que se genere una diferencia de caminos entre el sonido. ¿Cómo esta diferencia de caminos hace que un objeto reduzca el ruido producido por su funcionamiento?**

5 **Explica por qué cuando se tienen recipientes llenos de agua a diferentes alturas, se pueden generar distintos sonidos.**

6 **Explica las razones para construir auditorios con techos en forma parabólica como sucede en la Ópera de Sídney.**



7 **Explica por qué el arpa, para generar diferentes sonidos, tiene unas cuerdas más largas que otras.**

8 **Explica por qué los sonidos producidos por un bajo son más graves que los sonidos producidos por una guitarra si su funcionamiento es similar.**

9 **Responde. ¿Por qué las cuerdas vocales de los hombres, en la mayoría de los casos, produce sonidos más graves que las cuerdas vocales de las mujeres?**

10 **Explica por qué cambian los sonidos en los instrumentos de cuerda cuando la longitud de las cuerdas cambia, como en los violines o las guitarras.**

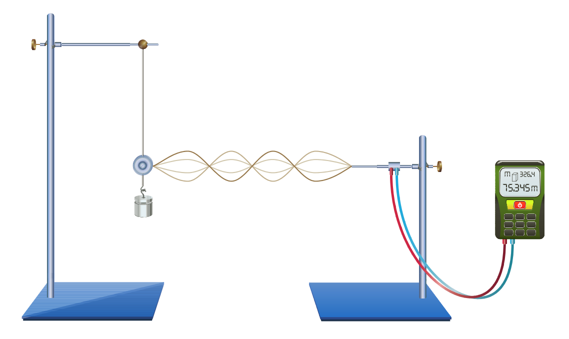
11 **La flauta de pan es un instrumento utilizado por diferentes culturas desde los griegos para amenizar sus festejos o rituales. Consta de varios tubos cerrados unidos, de distintas longitudes. Explica por qué se generan diferentes sonidos en este instrumento.**





Problemas básicos

12 **En la figura, la onda se propaga con una velocidad de 80 m/s y la cuerda tiene una longitud de 4 m. ¿Cuál será la frecuencia de vibración?**



13 **Si una cuerda se acorta 15 cm, emite un sonido con frecuencia fundamental de 350 Hz, y si se acorta 5 cm, emite un sonido de 120 Hz, ¿cuál es la longitud de la cuerda?**

14 **Calcula el quinto armónico de un tubo abierto de 1,2 m de longitud.**

15 **Halla el tercer armónico de un tubo cerrado si su longitud es de 30 cm.**

16 **Una varilla de hierro de 1,2 m de longitud, tiene sus extremos fijos. Mediante suaves golpes se excitan ondas transversales estacionarias. El sonido se propaga en el hierro a 5.130 m/s.**

a. Halla la frecuencia fundamental de los cuatro primeros armónicos de las ondas estacionarias.

b. Calcula la longitud de onda producida en la varilla, con respecto a uno de los extremos, para los tres primeros armónicos.

c. Realiza el dibujo representativo de la onda estacionaria para cada caso.

17 **La velocidad del sonido en el aire a 20 °C es de 340 m/s.**

a. ¿Cuál es la longitud de un tubo cerrado cuya frecuencia fundamental corresponde a la nota la de 440 Hz?

b. ¿Cuáles son las tres primeras frecuencias armónicas de ese tubo?

c. ¿Cuál debería ser la longitud de un tubo abierto para producir un sonido con una frecuencia fundamental de 440 Hz?

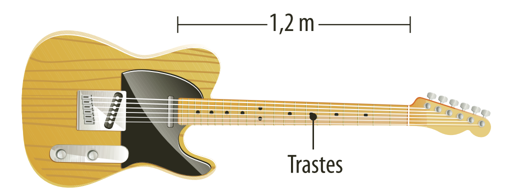
d. ¿Cuáles son las tres primeras frecuencias armónicas para el tubo abierto?



Problemas de profundización

18 **Un alambre de longitud 60 cm se mantiene fijo de sus extremos A y B como lo muestra la figura. Si es excitado por una fuente con una frecuencia de 60 Hz, forma una onda mecánica estacionaria con 5 nodos, ¿cuál es la velocidad de propagación de la onda en el alambre?**

19 **La parte vibrante de una cuerda de una guitarra eléctrica tiene 1,2 m de longitud. Esta cuerda está sometida a una tensión de 1.800 N y tiene una densidad lineal de 0,02 kg/m. Tocando la cuerda en un punto, un músico produce vibraciones estacionarias correspondientes al modo fundamental de vibración. El instrumento dispone de trastes, que permiten cambiar los sonidos cuando se presionan, como se muestra en la figura.**



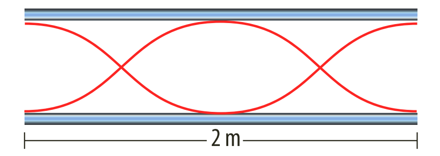
Responde:

a. ¿Cuál es la velocidad de propagación de las pulsaciones en la cuerda de la guitarra?

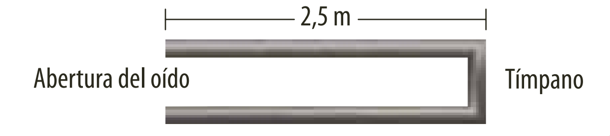
b. Los extremos de la cuerda vibrante son fijos. ¿Estos son los vientres? Representa el modo fundamental de vibración.

c. ¿Cuál es la longitud de onda y la frecuencia cuando se toca la cuerda sin utilizar los trastes?

20 **Una columna de un tubo sonoro abierto vibra como se observa en la figura. ¿Cuál es la longitud de onda de acuerdo con las condiciones dadas?**



21 **El conducto auditivo del ser humano se puede representar como un tubo cilíndrico de una longitud aproximada de 2,5 cm como se observa en la figura. ¿Cuál es la frecuencia fundamental de las ondas estacionarias generadas en este tubo?**



Vibración como fuente de sonido

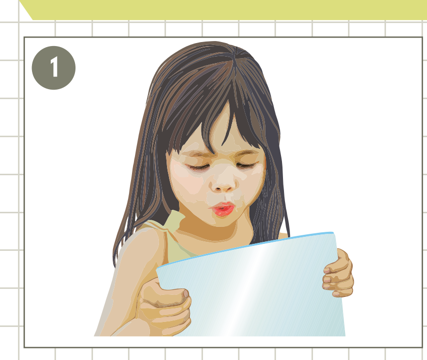
La experiencia cotidiana nos indica que el **sonido** es un fenómeno que se produce mediante ondas. Cuando se golpea un objeto, se generan en él oscilaciones que se transmiten a las moléculas de aire, y se propagan de forma análoga a como se propagan las ondas longitudinales en un resorte. En esta práctica analizaremos el sonido y sus causas.

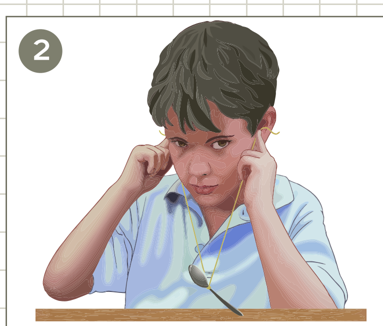
Conocimientos previos

Ondas

Materiales

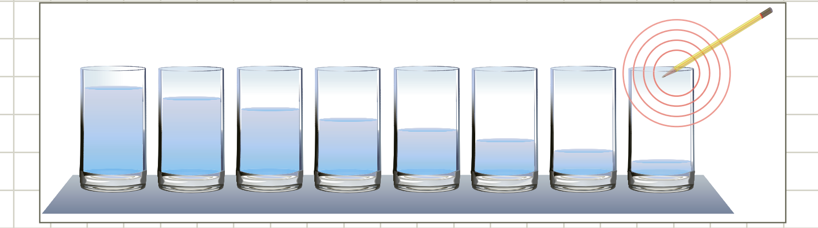
- Dos hojas de papel
- Una pieza de papel celofán de 5 × 5 cm
- Un globo
- 1,20 m de cuerda
- Una cuchara sopera metálica
- Un lápiz
- 8 vasos de cristal de igual altura





Procedimiento

1. Extiende las dos hojas de papel en la mesa, una sobre otra; desliza ligeramente la hoja inferior hacia delante aproximadamente 1,5 cm.
2. Sostén las hojas con las manos frente a tu boca. Sopla en el centro de ellas y observa. Ajusta todos los factores hasta que generes sonido (figura 1).
3. Toma el celofán y estíralo con tus dedos. Sopla fuertemente sobre él y escucha el sonido.
4. Haz un nudo corredizo en la cuerda para sujetar el mango de la cuchara: sostén cada extremo de la cuerda contra la pared externa de tus orejas. Asegúrate de que hagan buen contacto tus orejas con el cordel (figura 2).
5. Balancea la cuchara y golpea con ella la mesa de trabajo. Percibe los sonidos que se producen.
6. Recarga tu oreja contra la superficie de la mesa de trabajo y da varios golpes con tu dedo, algunos fuertes y otros suaves.
7. Infla un globo y sostenlo contra tu oreja. Da algunos golpecitos sobre él y escucha; ten cuidado de no reventarlo mientras esté cerca de tu cara.
8. Vierte en los vasos diferentes cantidades de agua y golpéalos suavemente con el lápiz. Percibe las diferencias en los sonidos.



Análisis de resultados

1. ¿Por qué genera sonido el papel celofán si se sopla sobre él?
2. ¿Por qué la velocidad de propagación del sonido en un sólido es mayor que en un líquido o en un gas?
3. ¿Por qué los sonidos que producen los objetos son diferentes entre sí?
4. ¿Por qué encontraste diferencia de sonido cuando los vasos tenían más agua unos que otros?

Sistemas resonantes

Los **tubos sonoros cerrados** en uno de sus extremos y abiertos en el otro, conocidos como tubos cerrados, son sistemas resonantes cuya frecuencia propia depende de su longitud y de la velocidad de propagación del sonido. En un tubo se pueden producir varias frecuencias llamadas, armónicos, una de ellas, conocida como la fundamental se determina mediante la expresión $f = \frac{v}{4 \cdot L}$ donde L es la longitud del tubo y v es la longitud de la onda.

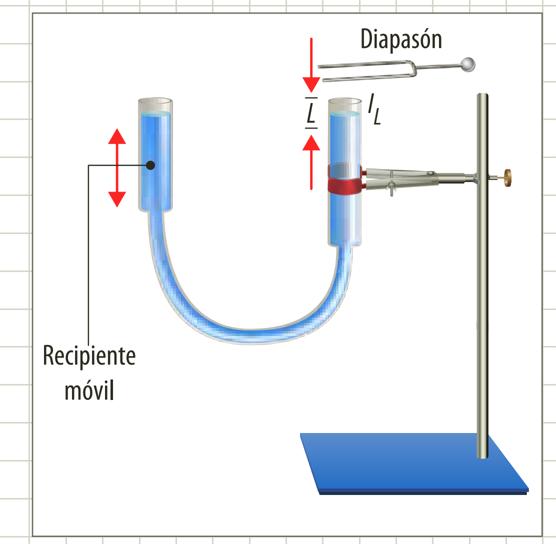
En esta práctica nos propondremos determinar la velocidad del sonido utilizando un diapasón y un tubo cerrado.

Conocimientos previos

Ondas y frecuencia.

Materiales

- Manguera
- Regla
- Dos tubos abiertos en sus dos extremos
- Soporte
- Pinza
- Diapasón de frecuencia 440 Hz
- Recipiente móvil



Procedimiento

1. Arma el montaje ilustrado en la figura. Es posible variar la longitud de la columna de aire, al cambiar la altura de la columna de agua, lo cual se logra al subir o bajar el tubo móvil.
2. Toma el diapasón y hazlo vibrar en la posición que indica la figura. Al variar la longitud L de la columna de aire desde un mínimo, encontrarás que para determinado valor de ella se escucha un sonido intenso, es decir, que se produce resonancia.
3. Repite la experiencia varias veces para verificar el valor de la longitud a la cual se produce resonancia.
4. Mide la longitud para la cual sucede la resonancia.
5. Aumenta la longitud de la columna de aire y encuentra otras longitudes para las cuales se produce resonancia.

Análisis de resultados

1. ¿Cómo puedes estar seguro que cuando empiezas a aumentar la longitud del tubo, la primera frecuencia de resonancia que percibes es la fundamental?
2. A partir de la expresión para la frecuencia fundamental de resonancia de un tubo cerrado determina la velocidad del sonido.
3. Construye un diagrama que ilustre el comportamiento de las ondas cuando se produce la resonancia.



El submarino

El submarino es un medio de transporte acuático que puede navegar sobre el mar y en sus profundidades. Para poder navegar con precaución utiliza señales de baja frecuencia como son las señales de radio, comprendidas entre los 3 y 30 kHz.

En esta parte se encuentra el periscopio y la antena de comunicaciones que ayuda a percibir señales.

Escotilla

El timón vertical permite efectuar giros hacia la derecha o hacia la izquierda.

La hélice permite el avance horizontal.

En la sala de máquinas se encuentra el motor que impulsa la hélice.

Reactor nuclear

Camarotes de tripulación y comedor



Uno de los problemas que enfrenta la tripulación de un submarino es el poco espacio que hay, incluso, puede causar trastornos sicológicos.



Los timones horizontales son utilizados para direccionar el submarino en dirección vertical y para generar un mayor o menor ángulo en las maniobras de inmersión y emersión.

Sala de control

El sonar puede emitir y recibir señales ultrasónicas para detectar objetos. Permite conocer a qué distancia se encuentran los obstáculos analizando los tiempos en que retorna la onda emitida.

Baterías



La sala de misiles y proyectiles es donde se guarda todo el armamento.

UNIDAD 4



Óptica

Temas de la unidad

1. La luz
2. Reflexión de la luz
3. Refracción de la luz
4. Instrumentos ópticos



Para pensar…

Nuestro sentido de la visión recibe incontables estímulos que provienen de diversos objetos. La luz que incide sobre estos cuerpos nos permite percibir el movimiento, la intensidad, e incluso el color de los mismos.

El estudio de la luz, realizado desde tiempos remotos, ha permitido adelantos significativos en cuanto a las telecomunicaciones, al entretenimiento (fotografía, video y música), a la medicina, en fin al desarrollo de una forma de vida diferente para el ser humano.

La óptica es la parte de la física que estudia el comportamiento y los fenómenos relacionados con la luz. En esta unidad estudiaremos este tipo de fenómenos.

Para responder…

- ¿Qué tipo de fenómenos naturales se relacionan con la luz?
- ¿Cuáles instrumentos ópticos conoces?



Figura 1. Isaac Newton (1643–1727) construyó la teoría corpuscular de la luz.

1. La luz

1.1 La naturaleza de la luz

El estudio de la luz ha ocupado a la comunidad científica desde hace muchos siglos. A lo largo del tiempo, sólo dos teorías han sido refutadas, una en contra de la otra. Una de estas teorías indica que la luz está compuesta por partículas que viajan en línea recta, mientras la otra defiende el hecho que la luz presenta un comportamiento ondulatorio.

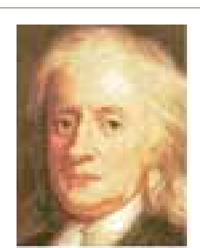
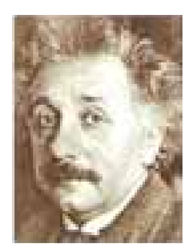
Pero, en el intento por elaborar una interpretación acerca de la naturaleza de la luz, se han presentado distintas visiones a lo largo de historia. A continuación haremos mención de estas teorías. Las primeras participaciones pertenecen a los griegos, entre ellos Leucipo (450 a.C.), quien consideraba que todo cuerpo desprendía una imagen que era captada por los ojos e interpretada por el alma. Posteriormente, Euclides (300 a.C.) introdujo la idea que de que la luz era un rayo emitido por el ojo y que se propagaba en línea recta hasta alcanzar el objeto.

- Aproximadamente en el siglo IV a.C. los seguidores de **Demócrito** favorecían la teoría que enunciaba que los cuerpos visibles emitían un flujo de partículas llamado luz. Mientras la corriente aristotélica explicaba que la luz era un pulso emitido por los cuerpos visibles.
- El médico árabe **Alhazén** (956-1039), fue el encargado de determinar que la luz procedía del Sol, siendo los ojos receptores y no emisores; y que en ausencia de la luz los objetos que no tenían luz propia no pueden reflejar nada y, por lo tanto, no se pueden ver.
- Durante la segunda mitad del siglo XVII, el estudio de la naturaleza de la luz cobró gran importancia entre los científicos de la época. En este contexto, **Isaac Newton** consideró que la luz estaba compuesta por pequeñas partículas denominadas corpúsculos; los corpúsculos se mueven en línea recta y a gran velocidad. Bajo este postulado, Newton construyó la **teoría corpuscular**, con la cual logró explicar los fenómenos de la reflexión y de la refracción de la luz, aunque para este último supuso que la velocidad de la luz aumenta al pasar de un medio menos denso a uno más denso. Como en aquella época no era posible medir la velocidad de la luz, sólo hasta 1850 el físico **Jean Bernard Foucalt** demostró, vía experimental, la falsedad de este hecho.
- Paralelamente a la teoría corpuscular de Newton, en 1678, surgió la **teoría ondulatoria** de la propagación de la luz, divulgada por **Christian Huygens** y **Robert Hooke**. En ella se consideraba la existencia de un material denominado **éter**, que cubría todo el universo y por el cual se propagaba la luz. De esta manera, Huygens explicó con bastante sencillez las leyes de la reflexión y de la refracción de luz, así como la doble refracción que exhiben algunos minerales y la lentitud con la que se propaga la luz en los medios más densos, contrario a lo expuesto por Newton.

Aunque la teoría ondulatoria de Huygens explicaba algunos fenómenos observados por Newton, en particular los colores que se formaban en películas delgadas, casi toda la comunidad científica decidió respaldar los fundamentos de Newton, quien para aquella época era considerado como una gran celebridad. Por tanto, la teoría corpuscular se consideró correcta durante todo el siglo XVIII.

- Al comienzo del siglo XIX, surgió nuevamente la polémica entre la teoría corpuscular de Newton y la teoría ondulatoria de Huygens. El inglés **Thomas Young** (1773-1829), quien realizó una serie de experimentos sobre la interferencia y la difracción inclinó la balanza de manera definitiva del lado de la naturaleza ondulatoria de la luz, solucionando así la controversia sobre la dualidad onda-corpúsculo con relación a la naturaleza de la luz.
- Dichas conclusiones fueron reforzadas por los trabajos realizados por el francés **Augustin-Jean Fresnel** (1788-1827), quien además del desarrollo de las bases matemáticas de la teoría ondulatoria, demostró que la propagación rectilínea de la luz, era consecuencia del valor extremadamente pequeño de la longitud de onda de las ondas luminosas.
- El respaldo final a la naturaleza ondulatoria de la luz se produjo a mediados del siglo XIX. En primer lugar gracias a la medición de la velocidad de la luz realizada por Foucalt y posteriormente, a la predicción de la existencia de las ondas electromagnéticas realizada por **James Clerk Maxwell** (1831-1879), el cual sugirió que la luz representaba una pequeña porción del espectro de ondas electromagnéticas, aquella cuyo intervalo de longitudes de onda era capaz de impresionar el ojo humano.
- La explicación de Maxwell fue confirmada por **Heinrich Rudolf Hertz** (1857-1894), quien generó ondas electromagnéticas a partir de circuitos eléctricos (radioondas), las cuales presentaban los mismos fenómenos de reflexión, refracción, polarización y difracción de la luz.
- A pesar de que se ponía fin a la polémica sobre la naturaleza de la luz, aún faltaba revisar el antiguo concepto del éter. **Albert Michelson** (1852-1931) y **Edward Morley** (1875-1955) realizaron un experimento cuyo objetivo era calcular la velocidad de la Tierra con respecto al éter. Debido a que el experimento realizado no mostraba que la Tierra tuviera una determinada velocidad con respecto al éter, se supuso que la Tierra, en su movimiento, arrastraba la capa de éter que la rodeaba. Sin embargo, este experimento no presentó las propiedades del éter, sino que puso en evidencia que su existencia era altamente improbable.

Historia del desarrollo de la luz

 Siglo IV a. de C. Demócrito	 1687 Cristian Huygens (1629-1695)	 1704 Isaac Newton (1642-1727)	 1801 Thomas Young (1773-1829)
 1821 Agustín Fresnel (1788-1827)	 1873 James Clerk Maxwell (1831-1879)	 1887 Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894)	 1905 Albert Einsten 1879-1955)




- Por otro lado, Albert Einstein (1879-1955) proponía la teoría de los cuantos de luz (actualmente denominados fotones), en la que explicaba que los sistemas físicos podían tener tanto propiedades ondulatorias como corpusculares. Este concepto lo utilizó para explicar el efecto fotoeléctrico descrito por Hertz.

De esta manera, se cierra el círculo de la naturaleza de la luz que se podría resumir en la siguiente conclusión fundamental:

Definición

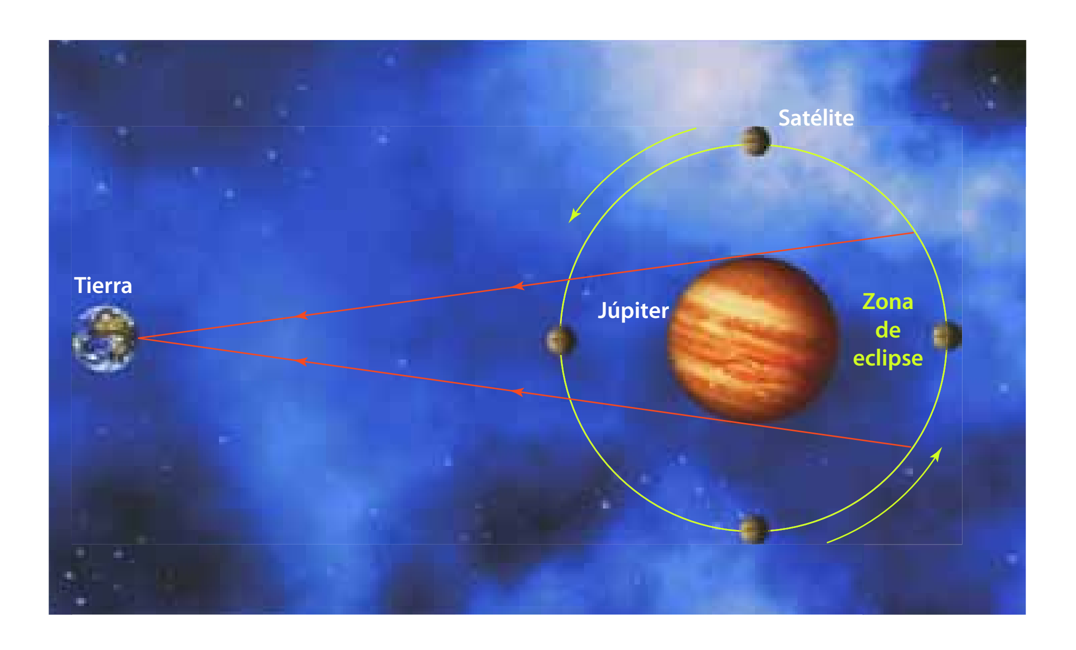
La luz se comporta como una onda electromagnética en todo lo referente a su propagación, sin embargo se comporta como un haz de partículas (fotones) cuando interacciona con la materia.

1.2 La velocidad de la luz

Las primeras estimaciones sobre la velocidad de la luz fueron realizadas por los antiguos griegos, para quienes la luz se propagaba de manera instantánea, es decir, que el tiempo empleado en desplazarse desde la fuente hasta el observador es tan corto que se podría considerar su velocidad infinita.

Al comienzo del siglo XVII gran parte de la comunidad científica de la época no estaba muy a favor de la existencia de la velocidad finita de la luz, ellos pensaban que esta podía recorrer cualquier distancia en forma instantánea. Sin embargo, Galileo no estaba de acuerdo con estas ideas y considerando que la luz empleaba cierto tiempo en su propagación, trató de medir su velocidad. Para ello, se ubicó a cierta distancia de uno de sus ayudantes, de tal forma que uno de los dos dirigía un haz de luz hacia el lugar donde se encontraba el otro, quien luego de cierto tiempo debería ver el resplandor; cada uno registraba el tiempo y su diferencia sería el tiempo empleado por la luz en recorrer dicha distancia. Como no hubo diferencia entre los tiempos, Galileo concluyó que si la luz no se propagaba instantáneamente, entonces su velocidad era extremadamente rápida.

La primera medida cuantitativa de la velocidad de la luz fue realizada por el astrónomo danés Olaüs Römer, en 1675, mientras trabajaba con Giovanni Cassini. Esta primera medida consistía en observar las variaciones sistemáticas de los tiempos empleados por una de las lunas de Júpiter en realizar dos eclipses sucesivos, como se representa en la siguiente figura.

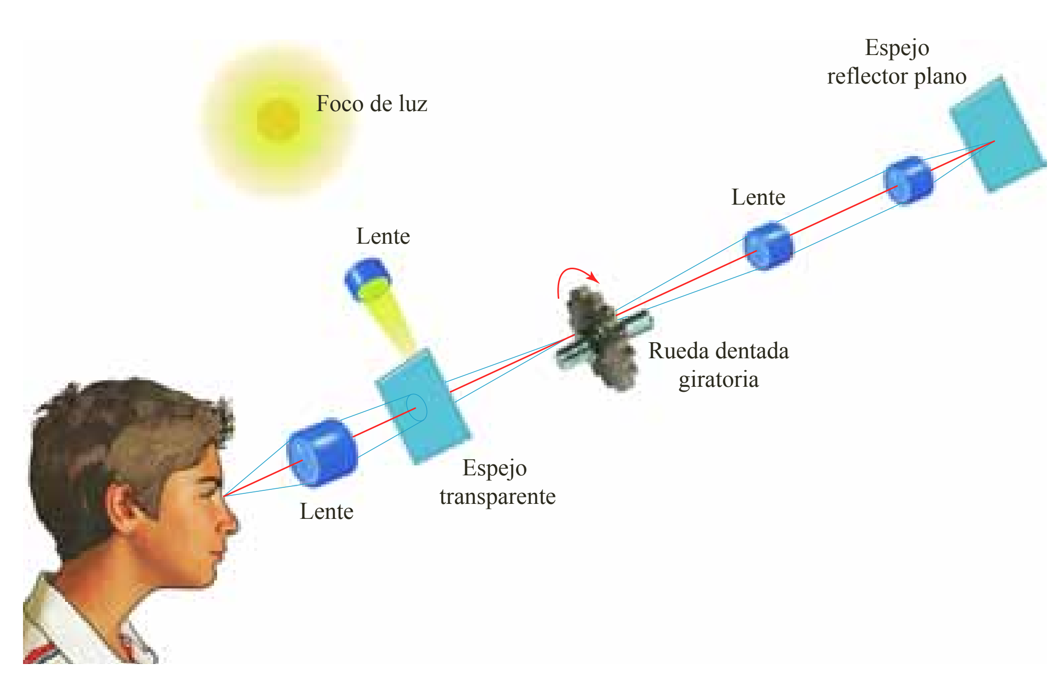


Mientras analizaba los datos del período del satélite, Römer observó que este período cambiaba a lo largo del año, más concretamente, que crecía cuando la Tierra se alejaba de Júpiter y disminuía cuando se acercaba. Con los datos registrados durante seis meses de alejamiento de la Tierra, encontró un valor de 22 minutos, por lo que determinó que la velocidad de la luz debía ser el cociente entre el diámetro de la órbita terrestre y el tiempo anterior, es decir,

$$c = \frac{3{,}0 \times 10^8\ \text{km}}{22\ \text{min} \cdot 60\ \text{s}} = 2{,}27 \times 10^8\ \text{m/s}$$

En 1729, el astrónomo británico James Bradley calculó la velocidad de la luz a partir de la diferencia entre la posición observada de una estrella y su posición real, debido a la combinación de la velocidad del observador y la velocidad finita de la luz. Este fenómeno denominado aberración de la luz, le permitió obtener un valor de $c = 3{,}04 \times 10^8$ m/s.

La primera medición no astronómica de la velocidad de la luz fue realizada por el físico francés Armand Fizeau en 1849. En lo alto de las colinas de Suresnes y de Montmartre, distantes entre sí 8,63 km, Fizeau ubicó un sistema de lentes de tal forma que la luz reflejada en un espejo semitransparente se enfocaba entre los huecos de una rueda dentada. La rueda, que giraba con una velocidad angular variable, a baja velocidad obstruía el paso de la luz reflejada por su diente; pero cuando la velocidad era lo suficientemente grande, admitía que la luz reflejada pasara a través del siguiente hueco de la ranura. De esta manera, la luz llega al espejo semitransparente, lo atraviesa y es percibido por el observador, tal como se muestra en la siguiente figura.



Si notamos como L la distancia entre la rueda y el espejo reflector plano, tenemos que el tiempo que tarda la luz en ir y regresar está dado por la expresión:

$$\Delta t = \frac{2L}{c}$$

siendo c la velocidad de la luz.

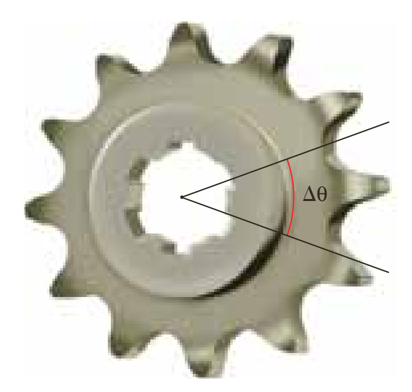


Figura 3. Rueda dentada utilizada por Fizeau en el experimento para medir la velocidad de la luz.

En ese tiempo Δt la rueda habrá girado un ángulo $\Delta\theta$ (figura 3), cuyo valor es:

$$\Delta\theta = \frac{2\pi}{n} = \omega \cdot \Delta t$$

Donde n representa el número de dientes de la rueda y ω la velocidad angular de la misma. Al despejar Δt y remplazar se obtiene que c es:

$$c = \frac{n}{\pi} \cdot \omega \cdot L$$

La rueda dentada utilizada por Fizeau tenía 720 ranuras y fue necesario elevar su velocidad angular hasta 25,2 rev/s, por lo tanto,

$$c = \frac{720}{\pi}(2\pi \cdot 25{,}2 \text{ rev/s})(8.630 \text{ m}) = 3{,}13 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Sin embargo, en 1862 el físico francés **León Foucault** realizó un experimento similar al de Fizeau, en el que sustituyó la rueda dentada por un prisma octogonal cuyos lados eran espejos (figura 4). De nuevo la velocidad angular del prisma y la distancia del mismo a un espejo fijo permitieron calcular la velocidad de la luz. El valor obtenido fue:

$$c = 2{,}98 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Posteriormente, en 1880, el físico norteamericano **Albert Michelson** realizó durante casi cincuenta años, mediciones precisas de la velocidad de la luz. Los resultados de estas mediciones le permitieron obtener un valor para c igual a $2{,}99 \times 10^8$ m/s.

En la actualidad se acepta que la velocidad de la luz en el vacío es una constante fundamental que tiene un valor:

$$c = 299.792.458 \text{ m/s}$$

El valor $c = 3{,}0 \times 10^8$ m/s es suficientemente exacto para la mayor parte de las aplicaciones.

✱ EJEMPLO

Considerando el modelo realizado por Fizeau, calcular el tiempo transcurrido para que la luz atraviese una ranura de una rueda dentada y se devuelva por la siguiente.

Solución:

Como la velocidad angular se relaciona con la frecuencia de revolución mediante la expresión: $\omega = 2\pi \cdot f$

Tenemos que el tiempo transcurrido, mientras la luz pasa por una ranura y se regresa por la siguiente, es:

$$t = \frac{2 \cdot \pi}{\omega \cdot n}$$

es decir, $t = \dfrac{1}{f \cdot n}$

Por tanto, obtenemos que:

$$t = \frac{1}{(25{,}2 \text{ rev/s})(720)} = 5{,}5 \times 10^{-5} \text{ s}$$

El tiempo que gasta la luz en su recorrido es $5{,}5 \times 10^{-5}$ segundos.

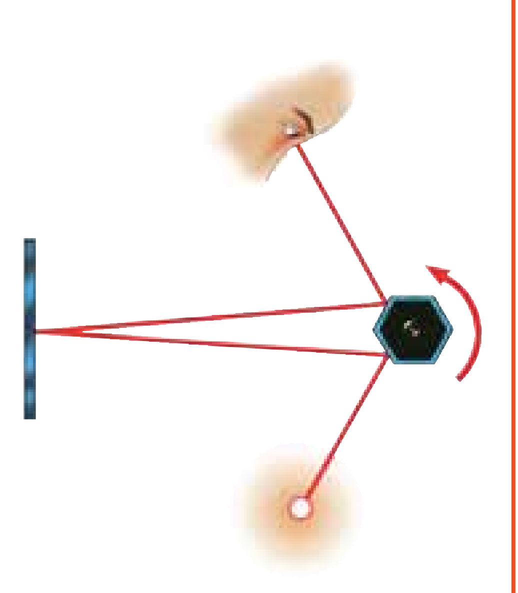


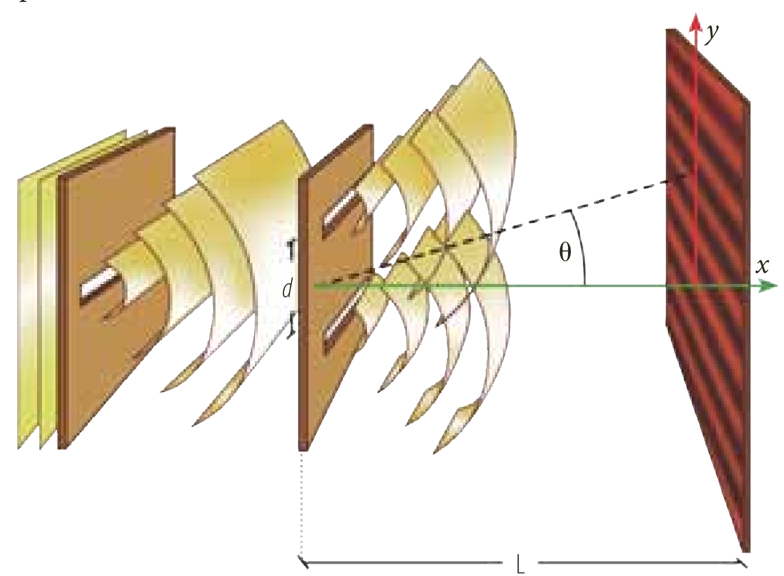
Figura 4. Experimento realizado por León Foucault para medir la velocidad de la luz, con el que obtuvo un valor de $2{,}98 \times 10^8$ m/s.

1.3 Interferencia de la luz

Debido a la naturaleza ondulatoria de la luz, es posible observar que dos haces de luz generan interferencia entre sí, la cual ocurre cuando en un mismo punto coinciden dos o más ondas, siendo su composición constructiva o destructiva. Para observar estas interferencias luminosas es necesario que las ondas individuales mantengan una relación de fase estable, es decir, que las fuentes tengan la misma frecuencia y que sus haces sean casi paralelos. Cuando esta situación predomina, se dice que las fuentes son **coherentes**. Si las fuentes son distintas (incoherentes), no es posible la producción de interferencia, ya que las ondas emitidas son independientes y no guardan relación de fase en el transcurso del tiempo.

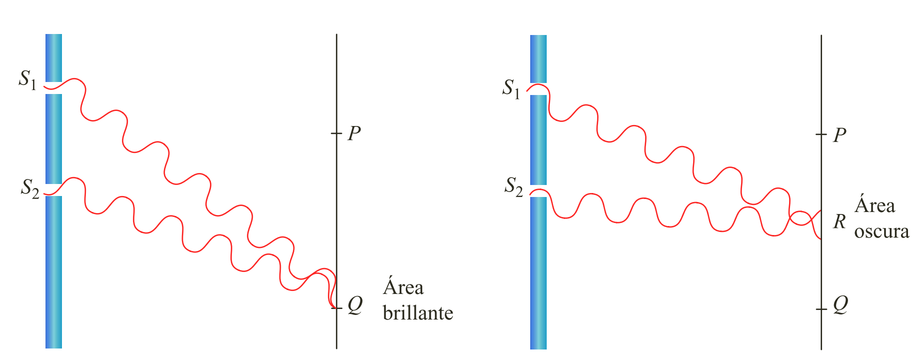
Pero, ¿cómo hacer para que dos fuentes luminosas sean coherentes?

En 1801, Thomas Young ideó el primer experimento para producir interferencias luminosas, el cual le sirvió para demostrar la naturaleza ondulatoria de la luz. En la siguiente figura se muestra un esquema del dispositivo utilizado.



Se puede observar un frente de onda que incide sobre dos rendijas horizontales. De estas dos rendijas surgen dos nuevos frentes de onda coherentes, con un patrón estable, que interfieren sobre una pantalla. Este patrón de interferencia está conformado por franjas brillantes y oscuras alternadas, que representan la interferencia constructiva y la interferencia destructiva de las ondas respectivamente.

En la siguiente figura se representan algunas maneras en las que se pueden combinar dos ondas sobre una pantalla.



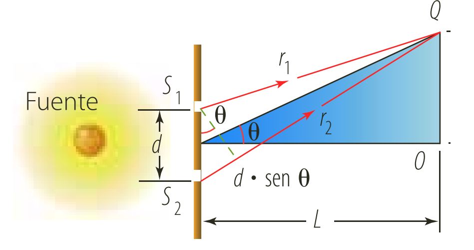


Figura 5. Representación geométrica del experimento de la doble rendija formulado por Thomas Young.

Para dar una descripción cuantitativa del experimento de Young, considera el punto Q ubicado a una distancia L de la pantalla de observación (figura 5). Si la fuente es monocromática, las ondas que salen de las dos ranuras se encuentran en fase, es decir, tienen la misma frecuencia y amplitud. Se puede observar que la distancia recorrida por las ondas que salen de la ranura inferior es mayor que la distancia recorrida por las ondas que salen de la ranura superior. Esta diferencia se denomina **diferencia de camino**, δ, y es:

$$\delta = r_2 - r_1 = d \cdot \text{sen}\,\theta$$

Donde d es la distancia entre las dos rendijas. Si la diferencia de camino es múltiplo entero de la longitud de onda, la interferencia es constructiva, por tanto,

$$\delta = d \cdot \text{sen}\,\theta = n\lambda$$

Siendo $n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \ldots$ De la misma manera, cuando la diferencia de camino es múltiplo impar de $\frac{\lambda}{2}$, la interferencia es destructiva, es decir,

$$\delta = d \cdot \text{sen}\,\theta = \left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda$$

Donde $n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \ldots$Por otra parte, la posición de las franjas brillantes, tomada desde O, es:

$$y_{brillante} = \frac{\lambda L}{d} n$$

y la posición de las franjas oscuras,

$$y_{oscuro} = \frac{\lambda L}{d}\left(n + \frac{1}{2}\right)$$

EJEMPLO

Una pantalla se encuentra a 120 cm de una fuente de luz compuesta por dos rendijas. La separación de las rendijas es 2 mm y la posición de las franjas de orden $n = 2$, tomada desde la línea central, es 4 cm. Determinar:

a. La longitud de onda de la luz.

b. La separación entre las franjas brillantes.

Solución:

a. Para determinar la longitud de onda de la luz, se tiene que:

$$y_n = \frac{\lambda L}{d} n$$

$$\lambda = \frac{d y_n}{nL} \qquad \textit{Al despejar } \lambda$$

$$\lambda = \frac{(2{,}0 \times 10^{-3}\ \text{m})(4 \times 10^{-2}\ \text{m})}{2 \cdot 1{,}2\ \text{m}} = 3{,}3 \times 10^{-5}\ \text{m}$$

La longitud de la onda luminosa es $3{,}3 \times 10^{-5}$ m.

b. La separación entre las franjas brillantes está dada por la expresión:

$$y_{n+1} - y_n = \frac{\lambda L(n+1)}{d} - \frac{\lambda L n}{d} = \frac{\lambda L}{d}$$

Al remplazar se tiene:

$$y_{n+1} - y_n = \frac{(3{,}3 \times 10^{-5}\ \text{m})(1{,}2\ \text{m})}{(2 \times 10^{-3}\ \text{m})} = 1{,}98 \times 10^{-2}\ \text{m}$$

La separación entre las franjas brillantes es 1,98 m.

1.3.1 Iridiscencia en películas delgadas

Seguramente habrás observado, en alguna ocasión, la gama de colores que se forman en las alas de una mariposa, o en las finas manchas de aceite sobre un suelo mojado (figura 6), o en las pompas de jabón. Estos efectos, en realidad, son franjas que resultan de la interferencia producida por la luz reflejada en la cara superior con la luz reflejada en la cara inferior.

En cada uno de estos casos, una parte de la luz que incide sobre la película es reflejada, mientras la otra es refractada. Las ondas reflejadas por la superficie inferior y superior tienen una diferencia de camino que genera en las ondas un desfase, el cual al incidir en el mismo punto de la retina del ojo se genera una interferencia constructiva y una interferencia destructiva.

Estas condiciones para interferencia constructiva y destructiva sólo son válidas si la película está rodeada por el mismo medio. Si la luz es de un solo color, es decir, de una sola longitud de onda, en la superficie de la película se observarán regiones brillantes y regiones oscuras. Pero, si la película es iluminada por luz blanca se observará una región iluminada.



Figura 6. Mancha de aceite. Los colores son producidos por la interferencia entre los rayos de luz reflejados.

1.3.2 Difracción de la luz

En el recuento histórico sobre la naturaleza de la luz, se mencionó la importancia que este fenómeno tuvo en su momento. Por otra parte, recordemos que las ondas al rodear un obstáculo presentan deformaciones, que posteriormente continúan su camino. En el caso de las ondas de luz esto se traduce en la nitidez de la sombra proyectada por un objeto opaco.

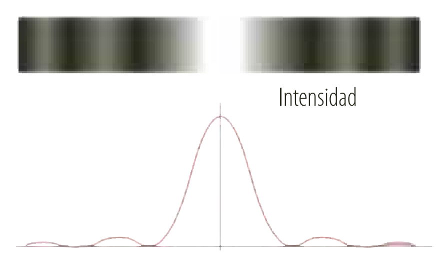
La difracción se observa mejor cuando la luz es coherente, es decir, cuando las ondas luminosas se encuentran en fase, propiedad que tiene la luz monocromática o de un solo color, como por ejemplo las lámparas de neón o el láser.

Para analizar la difracción de la luz, considera una rendija, como las del experimento de Young, iluminada por una fuente. Supón que la luz atraviesa la rendija y se proyecta sobre una pantalla. Una primera apreciación nos llevaría a pensar que sobre la pantalla se proyecta la imagen de la rendija, sin embargo, en realidad aparecen franjas brillantes y oscuras similares a las del experimento de Young.

Según el principio de Huygens, la rendija actúa como infinidad de rendijas muy finas que producen interferencia. La distribución de las franjas oscuras de la rendija está dada por la expresión:

$$\text{sen}\,\theta = n\frac{\lambda}{a}$$

Donde a representa el ancho de la rendija y $n = \pm 1, \pm 2, \pm 3,\ldots$ Por otro lado, la intensidad luminosa se distribuye de manera que casi toda la energía se concentra en la parte central como se muestra a continuación:



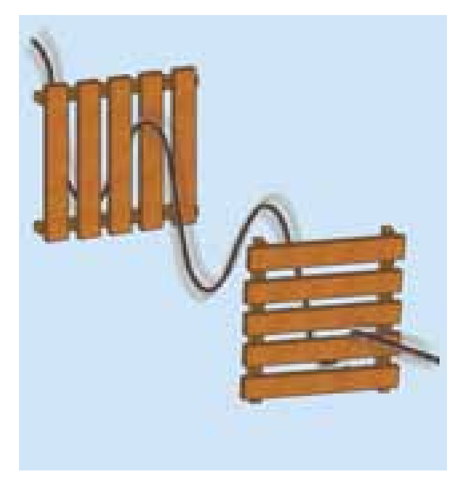


Figura 7. Esquema para la representación de la polarización de una onda mecánica.

1.4 Polarización de la luz

La polarización se define como el desplazamiento instantáneo de las partículas que oscilan. Un ejemplo muy práctico se da cuando se propagan ondas a través de una cuerda, al enviar pulsos perpendiculares las partículas vibran de arriba hacia abajo y la transmisión es perpendicular a la dirección del movimiento, formándose así el plano de vibración.

Si la cuerda atraviesa dos rendijas una perpendicular y otra horizontal es posible que el plano de vibración de la cuerda no presente dificultad al pasar por la primera rendija pero no podrá hacerlo por la segunda, como se observa en la figura 7.

Este efecto observado evidencia que la luz presenta un comportamiento similar al de las ondas transversales, ya que si fuese su comportamiento igual al de una onda longitudinal, no se produciría variación alguna en la oscilación de la onda.

En 1669, **Erasmus Bartholín** halló un indicio de la polarización de la luz al descubrir que un cristal de calcita, conocido como **espanto de Islandia**, producía una doble imagen cuando se observaba a través de él. Huygens explicó el fenómeno afirmando que cuando una onda llegaba al cristal se dividía en dos: una que se propaga en todas las direcciones a través del cristal y otra cuya velocidad dependía de la dirección respecto a una línea especial del cristal.

Por otra parte, Newton explicó que las partículas que formaban el flujo de luz se orientaban de manera diferente al entrar al cristal.

Posteriormente, **Etiene Malus**, en 1808, encontró que esta propiedad sólo se presenta en algunas sustancias, por lo que Young concluyó que la luz era una onda transversal y que el plano en el cual se encuentran contenidas se denomina plano de polarización.

Actualmente se sabe que la luz es una onda electromagnética, que es producida por la vibración de los electrones y que un solo electrón que vibra emite una onda electromagnética polarizada.

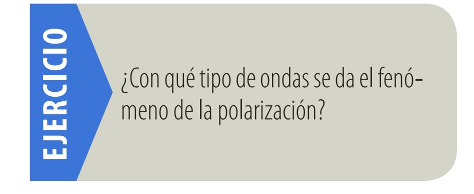
Así, si el electrón vibra en dirección vertical emite luz con polarización vertical, y si vibra en dirección horizontal emite luz horizontalmente polarizada. Esto se debe a que los electrones no tienen un plano de vibración privilegiado, por lo cual vibran en muchas direcciones.

Las fuentes de luz comunes, como la luz de la bombilla incandescente o una lámpara fluorescente o el Sol o una vela, emiten luz no polarizada, debido a que están compuestas por ondas ubicadas en diferentes planos que varían al azar.

Debido a que el ojo humano no distingue entre la luz polarizada y la no polarizada, y menos la luz conformada por ambas, se hace necesario la utilización de un dispositivo para identificarlas.

Algunos cristales tienen la propiedad de absorber ondas de luz que vibran en diferentes planos y permitir el libre paso de aquellas ondas que están contenidas en determinado plano. Estos cristales se denominan **polarizadores**. Verifiquemos algunas características de estos cristales y su forma de polarizar la luz:

- Todos los cristales transparentes de forma natural, cuya estructura no es cúbica, tienen la propiedad de cambiar el plano de polarización a un solo plano. La dirección del plano de polarización que transmite el cristal se llama eje del cristal.



- Otros cristales, en su interior, hacen que la luz no polarizada vibre en dos planos perpendiculares entre sí, como es el caso del cristal de Islandia. Estos cristales reciben el nombre de **birrefringentes**. Los cristales birrefringentes cambian de color según el ángulo con el que son observados, a esta propiedad se le llama dicroísmo y por ello también se denominan dicroicos.
- Hay otro grupo de cristales que en su interior realizan la misma función que los anteriores, pero, absorben uno de los planos y transmiten el otro plano de vibración. La herapatita, que es utilizada en la construcción de filtros de polaroid, es un ejemplo de estos cristales.

El filtro polaroid fue diseñado por **Edwin Land**, en 1928, y consiste en una serie de moléculas ordenadas de manera paralela entre sí, que actúan como un par de ranuras permitiendo que cierta orientación de polarización pase sin que haya absorción de energía, a esta orientación se le conoce como eje del polaroid. Si transmite polarización horizontal, el eje del polaroid es horizontal y si la transmisión es vertical el eje del polaroid es vertical.



Figura 8. Las gafas de sol constituyen una de las aplicaciones más comunes de la polarización.

A continuación describiremos algunas aplicaciones de la polarización.

- Uno de los ejemplos más comunes de la utilización del polaroid son los lentes que nos protegen del Sol. El eje de transmisión de estos lentes es vertical debido a que la mayor parte del resplandor que vemos procede de superficies horizontales.
- Si levantas tu dedo pulgar, con el brazo extendido, y lo miras con un solo ojo puedes observar que cambia su posición, con respecto al fondo, según el ojo con el que se mire. Esto se debe a que, por estar en posiciones levemente diferentes, las imágenes que observa cada ojo presentan una pequeña diferencia. El cerebro recibe estas dos imágenes y, al combinarlas, produce la sensación de profundidad.

  Las películas en tercera dimensión se filman tomando dos imágenes desde puntos levemente separados. Estas dos imágenes se proyectan juntas pero con una polarización vertical y otra con polarización horizontal.

  Sin anteojos especiales cada ojo recibe las dos imágenes y el resultado es la visión borrosa. Pero si se utilizan anteojos de manera que una lente tenga el eje polarizante horizontal y la otra vertical, cada ojo ve solamente una de las imágenes y el cerebro, al combinarlas, produce la sensación de profundidad.
- Otra aplicación de la polarización de la luz se encuentra en los cristales líquidos. En ellos los átomos o las moléculas están dispuestos en un esquema similar al de un cristal sólido. Sin embargo, ese esquema no es completamente rígido, se puede variar mediante cambios de temperatura o mediante un estímulo eléctrico. En estos cristales como los utilizados en las pantallas de las calculadoras, un estímulo eléctrico produce un cambio en la dirección del eje de transmisión de la luz.
- Cuando la luz se refleja, se polariza en dirección paralela a la superficie reflectante. Por ejemplo, la luz solar que se refleja en la carretera, está polarizada horizontalmente. Por eso, es conveniente que los anteojos para el sol que se utilizan al conducir un vehículo, sean de vidrios polarizadores con ejes verticales, de esta manera se evita el reflejo.

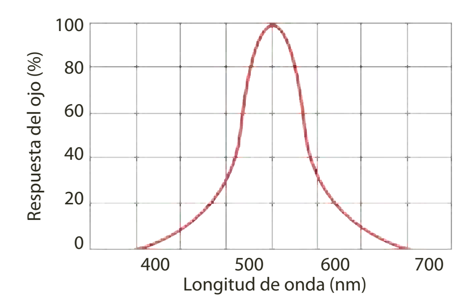


Figura 9. El ojo humano es más sensible a una longitud de onda de 550 nm.

1.5 La fotometría

La fotometría es el estudio de la medición de la luz como el brillo percibido por el ser humano, es decir, la verificación de la capacidad que tiene la radiación electromagnética de estimular la visión. Esta energía radiante es medida en vatios (W), sin embargo no es apropiado utilizar esta unidad de medida para indicar la sensación visual que conocemos como brillantez, ya que el ojo no tiene la misma sensibilidad a todas las longitudes de onda, es decir, no tiene la misma sensibilidad a todos los colores.

La figura 9 muestra una relación entre la longitud de onda y la respuesta del ojo a una misma potencia de luz. Se observa que el ojo es más sensible a la longitud de onda de 550 nm, la cual corresponde al color amarillo-verde. Por lo cual, es que el ojo percibe con mayor intensidad la luz emitida por una bombilla de color amarillo que la luz emitida por una bombilla de color azul con la misma potencia. Esta percepción de diferencia de brillantez se mide mediante el flujo luminoso *(F)*, cuya unidad de medida es el lumen (lm). Sin embargo, la sensación de brillantez está relacionada con el flujo luminoso y no con la potencia, por tanto, definimos iluminancia o iluminación *(E)*, de una superficie como el flujo luminoso *(F)* que incide perpendicularmente por unidad de área, es decir:

$$E = \frac{F}{A} = \frac{F}{4\pi \cdot r^2}$$

La unidad de medida de la iluminancia o iluminación es el lux, y es equivalente al lumen/m^2, es decir, que la iluminación es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia de la fuente.



Un lumen equivale a $\frac{1}{680}$ W de luz amarilla verde (λ = 550 nm).

$$1 \text{ lumen} = \frac{1}{680} \text{ W}$$

EJEMPLO

Se percibe una iluminación de 2 lux sobre una mesa. Si la lámpara que la produce se encuentra a 4 m por encima de la mesa y emite una luz azul (λ = 470 nm), ¿cuál es la potencia de la luz que emite?

Solución:

Para una longitud de onda igual a 470 nm el ojo percibe sólo el 20% de la luz (figura 9). Por tanto, la iluminación producida por la lámpara que percibe el ojo (E_p) es:

$$E = \frac{E_p}{20\%} = \frac{2 \text{ lux}}{0{,}2} = 10 \text{ lux}$$ *Al remplazar y calcular*

Por tanto, $E = \frac{F}{4\pi \cdot r^2}$

$F = E \cdot 4\pi \cdot r^2$ *Al despejar F*

$F = 10 \text{ lux} \cdot 4\pi \cdot (4 \text{ m})^2 = 2.010{,}62 \text{ lm}$ *Al remplazar y calcular*

Como 1 lumen = $\frac{1}{680}$ W, entonces:

$$\frac{2.010{,}62 \text{ lm}}{680 \text{ lm}} = \frac{P}{1 \text{ W}}$$ *Al establecer la proporción*

$P = 2{,}97$ W *Al calcular*

La luz que emite tiene una potencia de 2,97 W.

2. Reflexión de la luz

2.1 Rayos de luz

Para explicar los fenómenos de interferencia, difracción y polarización de la luz la hemos caracterizado por medio de sus frentes onda. Si consideramos una fuente de luz puntual, el frente de onda producido por ella es esférico, ya que la luz se propaga en forma homogénea a través de un espacio homogéneo.

A medida que la luz se propaga, el frente de onda aumenta como si fuera un gran globo y su intensidad se distribuye en toda la superficie de la esfera hasta iluminar todos los puntos que son alcanzados por él (figura 10). Para un observador que recibe la luz emitida por la fuente, esta viaja hacia él en línea recta, y su trayectoria denominada rayo de luz, es perpendicular al frente de onda.

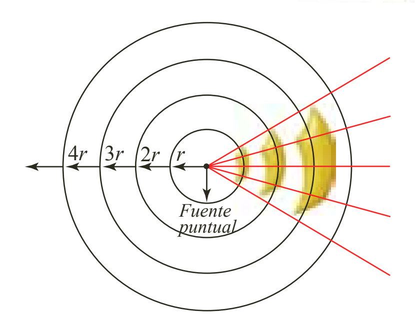


Figura 10. La luz se propaga en un frente de onda esférico que ilumina todos los puntos alcanzados por él.

Definición

Un rayo de luz se puede considerar como la línea imaginaria trazada en la dirección de propagación de la onda y perpendicular al frente de onda.

Cuando la fuente puntual se encuentra muy lejos del objeto sobre el cual incide, sus frentes de onda pueden ser considerados como planos. Un ejemplo de ello es la luz proveniente del Sol, cuya distancia a la Tierra es de 150.000.000 km, y sus rayos luminosos son percibidos paralelos entre sí y, por consiguiente, los frentes de onda planos.

Definición

Un haz de rayos es el conjunto de rayos provenientes de una fuente puntual.

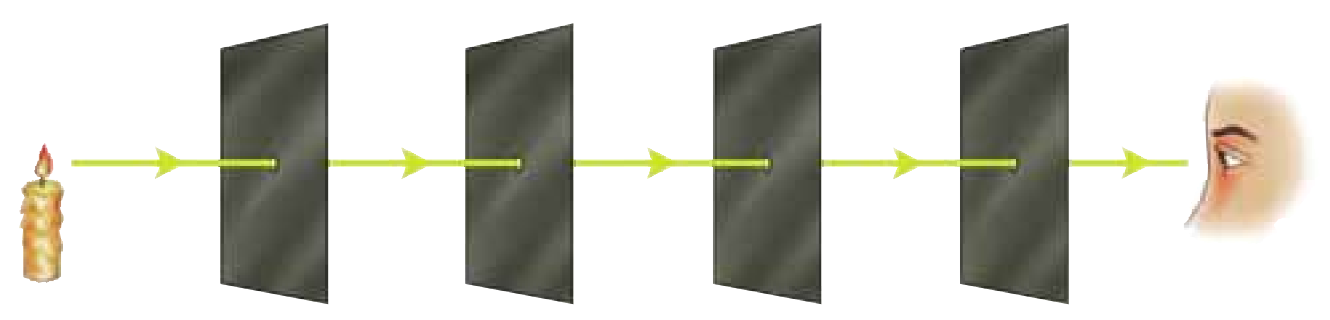
Un rayo de luz es una idealización, a partir de la cual se pretende describir el comportamiento de la luz. Al estudio de la luz por medio de rayos se denomina óptica geométrica. La óptica geométrica es utilizada para la construcción de lentes que corrigen defectos del ojo como la miopía, la hipermetropía, el astigmatismo, etc. También se usa en diferentes instrumentos ópticos, tales como telescopios, microscopios, estereoscopios, etc.

El diseño y manejo de los rayos de luz, fue una idealización estudiada por Newton en el siglo XVII, debido a que se hacía prácticamente indispensable un sistema para dar una explicación al fenómeno de la dispersión de la luz blanca según la ley de Snell.

La trayectoria que describe la luz al propagarse viene determinada en función del principio de Fermat, denominado principio de tiempo mínimo: *"cuando un rayo de luz viaja entre dos puntos, su trayectoria real será aquella que requiera el mínimo tiempo"*.

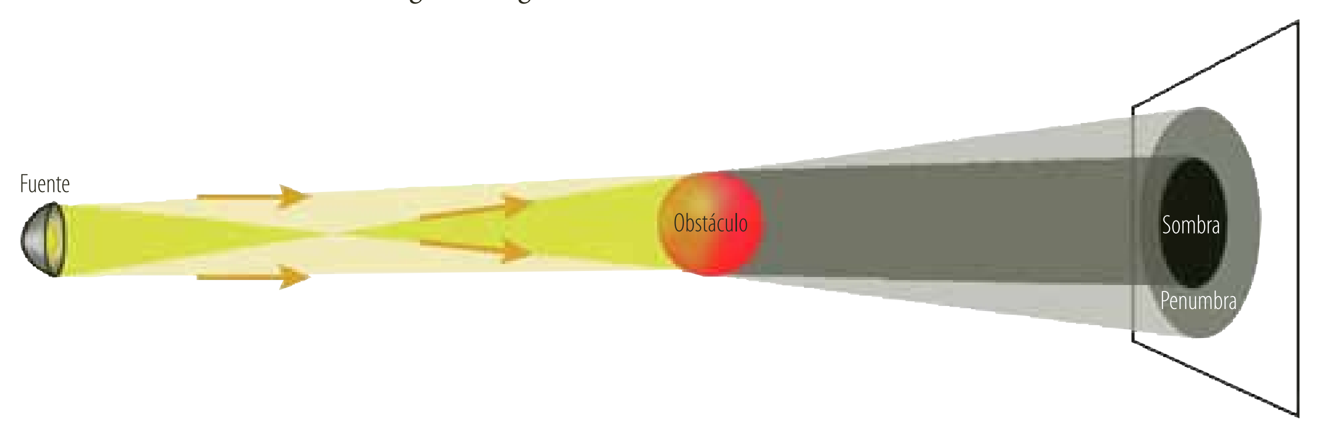
La luz en un medio homogéneo e isótropo presenta una velocidad de propagación constante y necesariamente, para desplazarse en el menor tiempo posible, debe recorrer la menor distancia posible, es decir, debe moverse describiendo una trayectoria rectilínea.

Un experimento sencillo para demostrar la propagación de la luz en línea recta, siempre que el medio de propagación sea homogéneo, se representa en la siguiente figura:



Se puede observar que se hace pasar luz a través de los agujeros de varias pantallas opacas hasta llegar al ojo del observador. Para lograrlo, se requiere que todos los agujeros y el ojo se encuentren en la misma línea recta.

Al iluminar un objeto opaco de tamaño relativamente grande, aparecen dos zonas claramente diferenciadas sobre la pantalla, como se observa en la siguiente figura.



El interior del círculo oscuro se denomina **sombra**, mientras que la franja que lo rodea **penumbra**. La penumbra va aumentando en intensidad luminosa a medida que se aleja del centro. La semejanza de los triángulos de la fuente, el obstáculo y la pantalla manifiestan la propagación rectilínea de la luz.

Si la luz se desplaza entre dos puntos que se encuentran ubicados en dos medios diferentes, el tiempo mínimo no supone que la distancia vaya también a ser la mínima, que sería una recta, sino que va a sufrir un cambio de dirección.

2.2 Reflexión de la luz

Cuando una onda alcanza la frontera entre dos medios, una parte de su energía es transmitida, dando lugar a otra onda de características similares a la de la onda incidente; esta onda recibe el nombre de onda transmitida. La otra parte de la energía se emplea en generar una onda que se propaga en el mismo medio; esta onda es conocida como onda reflejada y cambia su dirección pero conserva la misma velocidad.

Cuando el medio es opaco y la luz incide sobre la superficie de un material de estas características, produce vibraciones en los electrones de los átomos o moléculas del material, ocasionando que este se caliente y que los electrones expidan la luz. Cuando esta onda reflejada incide sobre nuestros ojos hace posible ver dicha superficie.



Los metales son un caso particular de los cuerpos opacos. En la superficie de los metales hay electrones libres que vibran cuando la luz incide y reemiten prácticamente toda la luz hacia fuera del material, lo cual produce su brillo característico.

Para describir de forma geométrica la reflexión de la luz, es conveniente definir una serie de elementos que se pueden apreciar en la figura 11 (recuerda que nos referiremos a los rayos de luz y no a los frentes de onda).

- El **rayo incidente** es el rayo que llega o incide en la frontera de los medios.
- El **rayo reflejado** es el rayo que se devuelve por el mismo medio, una vez llega a la frontera.
- La **normal**, *N*, es la recta perpendicular a la línea que divide los dos medios, es decir, la superficie del segundo medio.
- **Ángulo de incidencia**, *i*, es el ángulo que forma el rayo incidente con la normal.
- **Ángulo reflejado**, *r*, es el ángulo que forma el rayo reflejado con la normal.

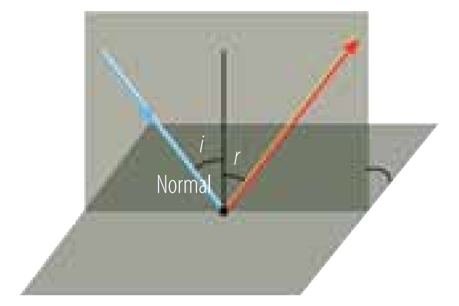
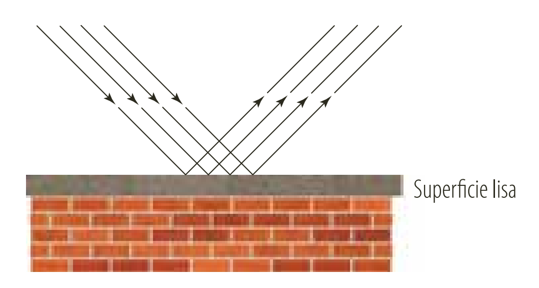
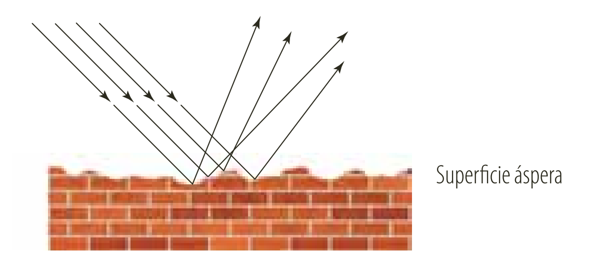


Figura 11. Representación geométrica de la reflexión de la luz.

La reflexión se denomina **especular** cuando un haz de luz se refleja en una superficie perfectamente pulida, de manera que todos los rayos llegan a ella con el mismo ángulo de incidencia y, por tanto, se reflejan paralelos unos a otros.



Sin embargo, la mayoría de superficies son rugosas y están constituidas por pequeñas superficies con distintas orientaciones, lo cual origina que al incidir los rayos de luz paralelos se reflejen en distintas direcciones, a este tipo de reflexión se le denomina **difusa**.

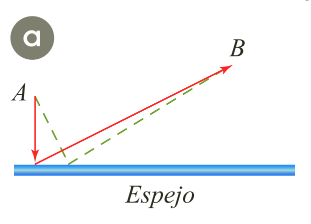


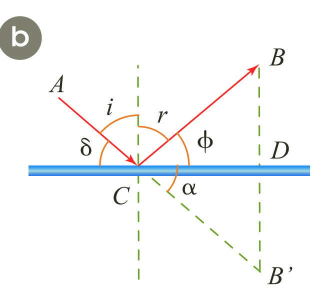
2.2.1 Ley de la reflexión

Debido al comportamiento ondulatorio de la luz, en ella se cumple la ley de la reflexión, es decir, que el ángulo de incidencia *(i)* es igual al ángulo de reflexión *(r)*.

Para comprender mejor la reflexión de la luz vamos a apoyarnos en el *principio del tiempo mínimo* de Fermat. Considera un rayo de luz que viaja de *A* a *B*, donde *A* está en el mismo medio que *B*, cruzando por un punto de un espejo. Si la luz viaja de *A* hasta *B* en el mínimo tiempo debe describir una trayectoria en línea recta. Pero, si la luz viaja de *A* hasta *B* cruzando por un punto del espejo, ¿cuál será la trayectoria en la que gasta menos tiempo?

Una trayectoria podría ser la mostrada por los vectores de líneas continuas en la parte a de la siguiente figura.





Se observa que la menor distancia de *A* hasta el espejo es la perpendicular y de allí parte hasta *B*.

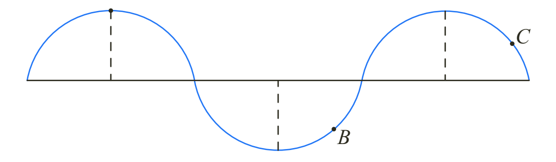
Ahora debemos determinar el punto exacto para que sea la mínima longitud de la trayectoria. Este punto es consecuencia del trazo del punto simétrico *B'* con respecto a la línea que divide los dos medios, tal como se muestra en la parte b de la figura. Entonces, la distancia mínima entre *A* y *B'* es la línea recta que los une y que pasa por el punto *C* del espejo. En la gráfica, se puede observar que la distancia de *C* a *B* es igual a la distancia entre *C* y *B'*, así los triángulos *CBD* y *CB'D* son congruentes y por tanto, el ángulo ϕ y el ángulo α también lo son.

Como los ángulos α y δ son opuestos por el vértice, entonces son congruentes. Al trazar la normal a la superficie del espejo, tenemos que, el complemento de δ es *i* y el complemento de ϕ es *r*, además como $\delta = \phi$ se puede decir que el ángulo de incidencia *(i)* es igual al ángulo de reflexión *(r)*.

$$\text{Ángulo de incidencia} = \text{Ángulo reflexión}$$
$$i = r$$

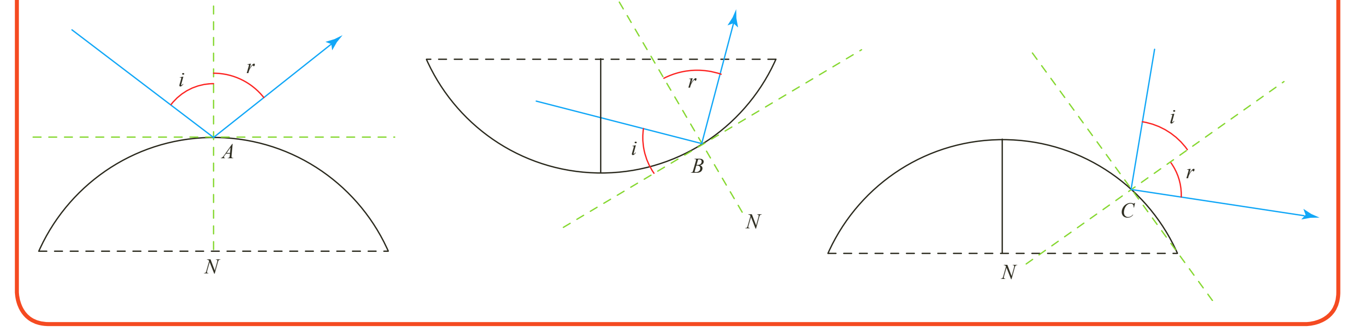
EJEMPLO

Trazar la trayectoria de un rayo de luz que incide, en el punto *A*, en el *B* y en el *C* de un espejo cuya superficie es de diferentes curvas.



Solución:

Para trazar la trayectoria del rayo reflejado construimos una tangente a la curva en el punto indicado, luego, trazamos la normal. Se grafica el rayo de luz incidente con un ángulo de incidencia *i* (respecto a la normal)





2.3 Imágenes por reflexión

Una de las aplicaciones más comunes de la óptica geométrica es la formación de imágenes por superficies reflectoras. Los espejos planos son de uso cotidiano y decorativo, pero también existen espejos cuyas superficies son esféricas, los cuales forman imágenes de características diferentes a las formadas por los espejos planos. Para entender las diferencias en la formación de imágenes, consideraremos las leyes de la reflexión de la luz.

2.3.1 Espejos planos

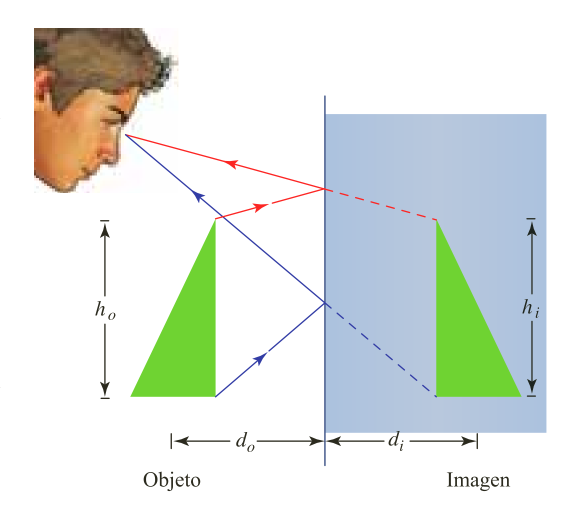
Toda superficie lisa y plana que refleje la luz especularmente, es decir, que refleje en una sola dirección un haz de rayos paralelos se denomina **espejo plano**.

En la siguiente figura se representa la imagen de un objeto reflejada en un espejo plano.

Se observa que cada rayo proveniente del objeto se refleja siguiendo la ley de la reflexión: $i = r$.

Las características de esta imagen son:

- Para un observador la luz parece provenir de una imagen ubicada detrás del espejo.
- La distancia d_0 del objeto al espejo es igual a la distancia d_i de la imagen al espejo.
- Tiene una inversión lateral con respecto al objeto.
- Siempre es derecha, es decir nunca aparece invertida.
- El tamaño de la imagen h_i es el mismo tamaño del objeto h_0.



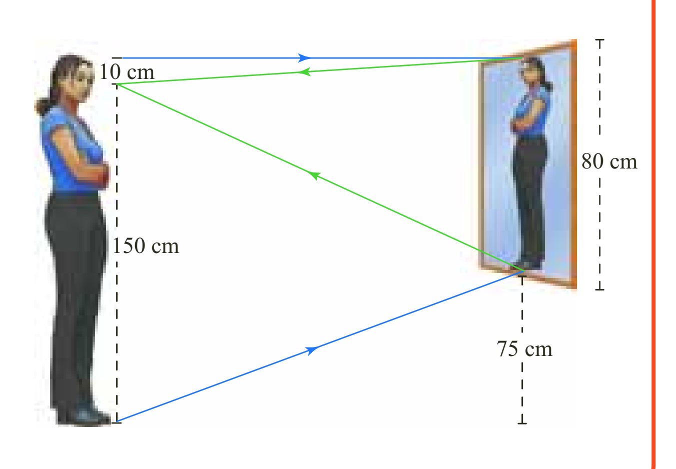
EJEMPLO

¿Cuál es la longitud mínima de un espejo para que una persona de 1,60 m de estatura pueda ver su imagen completa?

Solución:

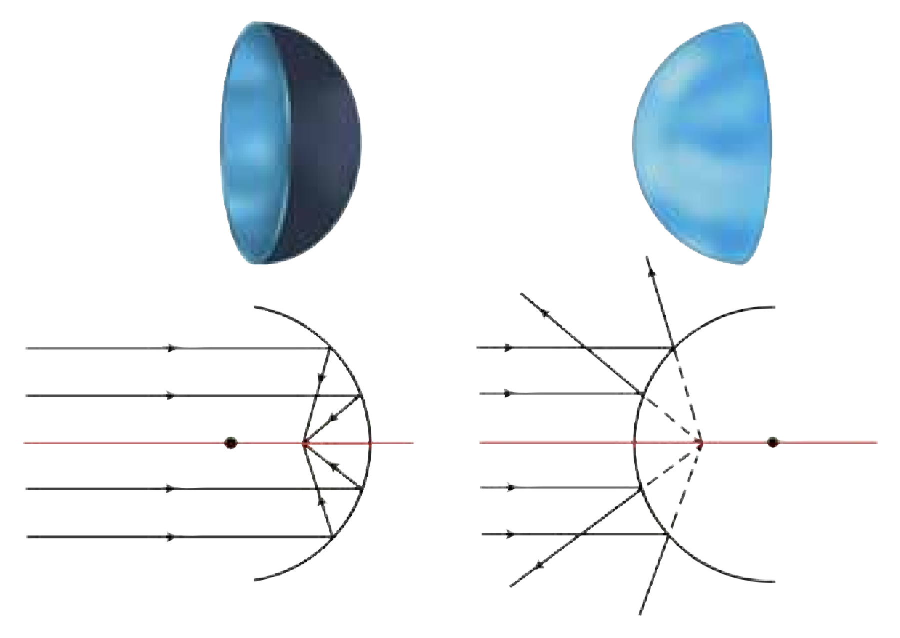
La distancia de los ojos a la parte superior de la cabeza de la persona es aproximadamente de 10 cm. Si los ojos observan la parte superior de la cabeza, en la imagen, es porque el rayo reflejado proveniente de la parte superior de la cabeza llega a ellos.

Como la normal biseca la distancia que hay entre los ojos y la parte superior de la cabeza (10 cm), entonces, la parte superior del espejo debe estar a la altura de 1,55 m. Para que los ojos observen los pies de la imagen se hace el mismo proceso, la normal biseca la distancia que hay entre los ojos y los pies (1,50 cm), luego la parte inferior del espejo debe estar a una altura de 0,75 m. Por lo tanto, la longitud mínima del espejo es de 0,80 m.



2.4 Espejos esféricos

Los espejos esféricos son casquetes de superficies esféricas regularmente reflectoras. De acuerdo con la cara del casquete por donde incida la luz, el espejo puede ser cóncavo o convexo. En un espejo cóncavo la superficie reflectora es la parte interior de la superficie esférica. En uno convexo, la luz incide por la parte externa de la superficie esférica. Tal como lo muestra la siguiente figura.



Tanto en los espejos cóncavos como en los convexos, se distinguen los siguientes elementos, que se señalan en la figura anterior:

- **Radio de curvatura**, R, que es el radio de la esfera a la cual pertenece el casquete.
- **Centro de curvatura**, C, punto central de la esfera.
- **El vértice**, V, es el centro topográfico del casquete esférico.
- **El eje óptico** es la línea recta que pasa por el centro de curvatura y el vértice.
- **El foco**, F, del espejo es el punto medio entre el centro de curvatura y el vértice. A la distancia entre el foco y el vértice del espejo se le conoce como distancia focal (f), así que:

$$f = \frac{R}{2}$$

Por otra parte, en la gráfica se observan tres rayos particulares denominados **rayos notables**:

- **Un rayo paralelo al eje óptico de la lente**, el cual incide sobre el espejo y al reflejarse pasa por el foco.
- **Un rayo que incide sobre el espejo pasando por el foco**, que se refleja en dirección paralela al eje óptico de la lente.
- **Un rayo que incide sobre la lente pasando por el centro de curvatura**, que se refleja por la misma recta y pasa por el centro de curvatura.

2.4.1 Construcción de imágenes en espejos cóncavos

La superficie interna de una cuchara es un espejo cóncavo. Cada rayo que incide sobre su superficie cumple con la ley de reflexión. Es como si un número muy grande de espejos pequeños y planos se montaran sobre la superficie esférica, en donde, cada espejo plano es perpendicular al radio de la circunferencia a la que pertenece.

Para determinar las imágenes de objetos en los espejos cóncavos, resulta práctico trazar los rayos notables que provienen del extremo superior del objeto, tal como se muestra en la figura 12. En este caso, el objeto se localiza entre el infinito y el centro de curvatura *C*. Observa cómo los tres rayos notables reflejados se intersecan en un mismo punto. En este punto, se localiza la imagen del extremo del objeto. La distancia entre el punto y el eje óptico equivale al tamaño o altura de la imagen. Para este ejemplo, la imagen se localiza en el mismo lado del objeto con respecto al espejo, se dice entonces que la imagen es real y para observarla se debe recoger en una pantalla, ubicada en ese mismo punto.

Esta imagen se caracteriza porque es: real, invertida, más pequeña que el objeto y se encuentra entre el centro de curvatura *C* y el foco *F*.

Experimentalmente tú puedes encontrar la distancia focal de un espejo cóncavo si orientas el eje óptico del espejo hacia el Sol, entonces, todos los rayos se reflejarán muy cerca del foco, recuerda que los rayos solares son rayos paralelos. Como todos los rayos convergen en ese punto, pones un papel frente al espejo, lo acercas o lo alejas hasta encontrar el punto más pequeño y brillante posible. La distancia de este punto al espejo es la distancia focal del espejo. Los telescopios reflectores usan espejos cóncavos gracias a la propiedad que tienen de converger los rayos paralelos.

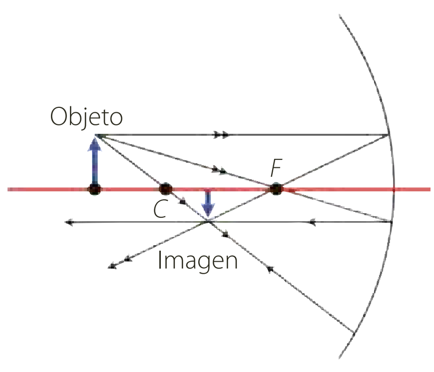


Figura 12. Formación de imágenes en un espejo cóncavo mediante la intersección de los rayos notables reflejados.

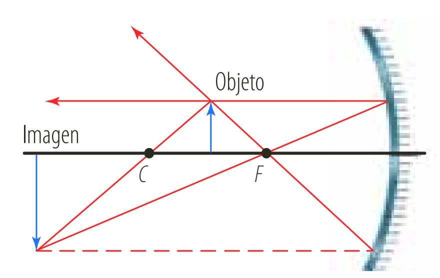
EJEMPLO

Construir geométricamente las imágenes de objetos, dadas por los espejos cóncavos y señalar sus características, si el objeto se encuentra:

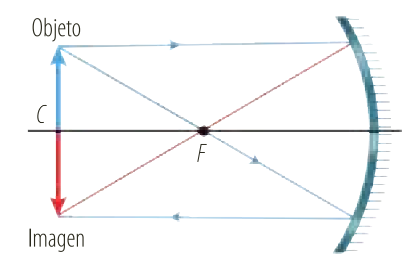
a. Entre el centro de curvatura y el foco.
b. En el centro de curvatura.
c. En el foco.
d. Entre el foco y el vértice.

Solución

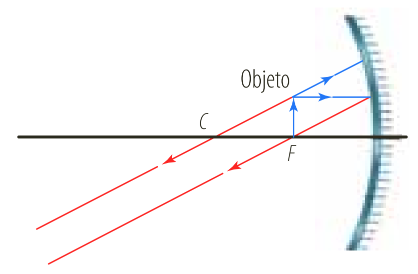
a. La imagen es real, invertida, de mayor tamaño que el objeto y se localiza entre el infinito y centro de curvatura.



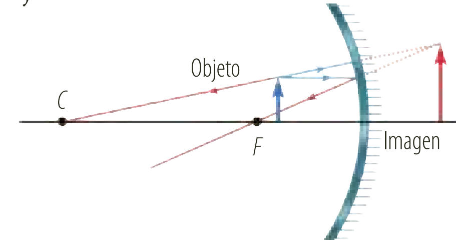
b. La imagen es real, invertida, del mismo tamaño que el objeto y se localiza en el centro de curvatura.



c. A medida que el objeto se acerca al foco, la imagen se aleja del espejo. Cuando está en el foco, todos los rayos reflejados son paralelos, se dice que la imagen está en el infinito.



d. La imagen se forma por la prolongación de los rayos reflejados y aparece detrás del espejo. La imagen es virtual, derecha y de mayor tamaño que el objeto.



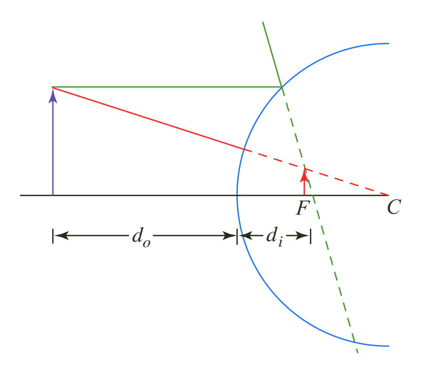


Figura 13. Formación de imágenes en un espejo convexo, con la intersección de la prolongación de los rayos reflejados detrás del espejo.

2.4.2 Construcción de imágenes en espejos convexos

En los espejos convexos la imagen formada siempre tiene las mismas características: virtual (porque la observamos detrás del espejo), derecha y más pequeña que el objeto.

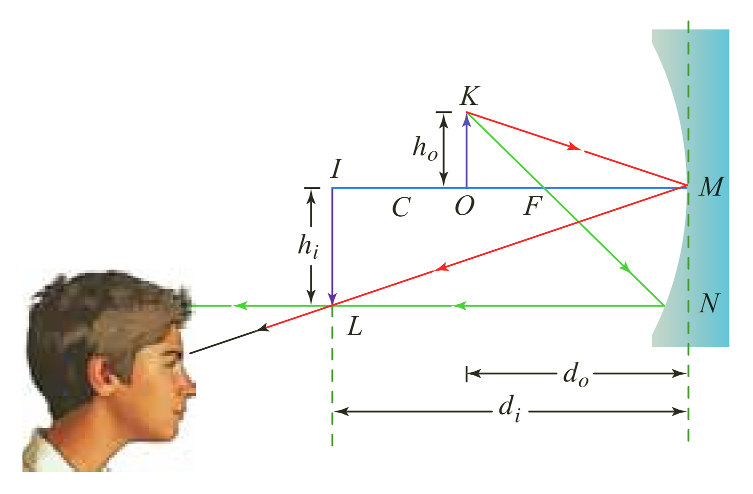
Para determinar la imagen trazamos los mismos rayos notables, sólo que estos divergen al reflejarse, entonces, la imagen se forma con la prolongación de los rayos reflejados detrás del espejo (figura 13). Para trazarlos, debemos tener en cuenta los siguientes aspectos (las líneas punteadas son prolongaciones de los rayos):

- Cuando el rayo incide en forma paralela, se refleja como si proviniera del foco, detrás del espejo.
- El segundo rayo se traza como si viniera del centro de curvatura y se refleja hasta el objeto.

2.4.3 Ecuaciones de los espejos esféricos

Es posible encontrar una ecuación que relacione la distancia de la imagen al espejo d_i, distancia del objeto al espejo d_0, tamaño o altura de la imagen h_i, tamaño o altura del objeto h_0 y la distancia focal f, estas ecuaciones son prácticas en la construcción de los espejos.

En la siguiente figura se representa un espejo cóncavo, un objeto, su imagen y dos rayos con sus respectivos reflejos.



Debido a que el rayo *ML* es el reflejo del rayo *KM*, el ángulo que forman con la normal (eje óptico) es congruente, por lo tanto, los triángulos *MOK* y *MIL*, son semejantes y se establece la proporción:

$$\frac{h_0}{h_i} = \frac{d_0}{d_i}$$

Como, $$\frac{h_0}{h_i} = \frac{OF}{FM} = \frac{d_0 - f}{f}$$

Al igualar tenemos $$\frac{d_0}{d_i} = \frac{d_0 - f}{f}$$

Al dividir entre d_0 $$\frac{1}{d_i} = \frac{1}{f} - \frac{1}{d_0}$$

EJERCICIO

Un espejo convexo con distancia focal 4 cm, está a 8 cm de un objeto de un 1 cm de altura. Determina la posición y el tamaño de la imagen del objeto.

Y al reorganizar términos encontramos la ecuación para los espejos esféricos:

$$\frac{1}{d_i} + \frac{1}{d_0} = \frac{1}{f}$$

El aumento se refiere a la relación entre la altura, o tamaño, de la imagen con respecto a la del objeto. Su ecuación resulta de la primera proporción, establecida anteriormente:

$$\frac{h_i}{h_0} = -\frac{d_i}{d_0}$$

El signo menos resulta de las convenciones de signos que a continuación se describen:

- Cuando el objeto, la imagen o el punto focal estén del lado reflejante del espejo (en el mismo lado en que inciden los rayos), la distancia correspondiente (d_i, d_0, o f, respectivamente) se considera positiva. Si están al otro lado del espejo son negativas.
- Las alturas, o tamaños, del objeto y la imagen (h_0, h_i, respectivamente) son positivas si se encuentran por encima del eje óptico. Si están por debajo son negativas.

EJEMPLO

Para mejorar la vigilancia, los dueños de un almacén, deciden poner un espejo de distancia focal 240 cm. Si una persona se encuentra en un pabellón a 6 m del espejo.

a. Localizar la imagen de la persona.

b. ¿Cómo es el tamaño de la imagen de la persona con respecto a su tamaño real?

c. Describir las características de la imagen.

d. Si la persona mide 2 m, ¿cuál es el tamaño o la altura de su imagen?

Solución:

a. Como la distancia focal es negativa el espejo es esférico y convexo. Por tanto se tiene que:

$$\frac{1}{d_i} + \frac{1}{d_0} = \frac{1}{f}$$

$$d_0 = 600 \text{ cm} \qquad \textit{Al expresar en cm}$$

$$\frac{1}{600 \text{ cm}} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{-40 \text{ cm}} \qquad \textit{Al remplazar}$$

$$\frac{-16}{600 \text{ cm}} = \frac{1}{d_i} \qquad \textit{Al calcular}$$

$$d_i = -\frac{600 \text{ cm}}{16} = -37{,}5 \text{ cm} \qquad \textit{Al despejar } d_i \textit{ y calcular}$$

La distancia de la imagen al espejo es −37,5 cm, el signo menos indica que es una imagen virtual.

b. Para encontrar la relación entre el tamaño de la imagen y el tamaño real del objeto, se tiene:

$$\frac{h_i}{h_0} = -\frac{-600 \text{ cm}/16}{600 \text{ cm}} = \frac{1}{16}$$

En el espejo la imagen de la persona es $\frac{1}{16}$ comparada con el tamaño real, como la relación es positiva indica que la imagen es derecha.

c. Como es un espejo convexo y de acuerdo con lo hallado anteriormente, la imagen es virtual, derecha y se ubica entre el foco y el espejo.

d. Para encontrar la altura de la imagen:

$$\frac{h_i}{h_0} = -\frac{d_i}{d_0} = \frac{h_i}{2 \text{ m}} = \frac{1}{16} h_i = \frac{2 \text{ m}}{16} = 0{,}125 \text{ m}$$

La imagen tiene una altura de 12,5 cm.

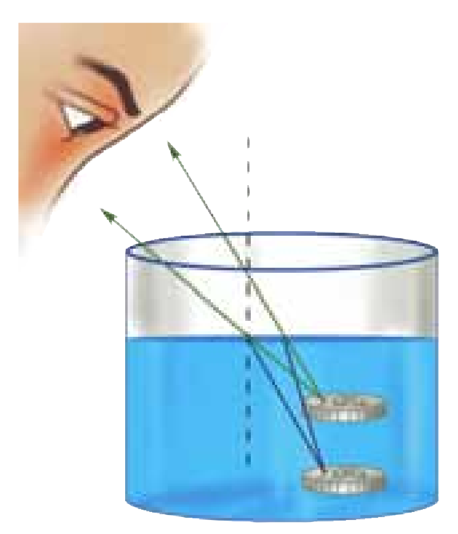


Figura 14. La percepción que se tiene del objeto cambia, si la onda de luz llega a la frontera entre dos medios.

EJERCICIO

¿Por qué el arco iris es un ejemplo de refracción?

3. Refracción de la luz

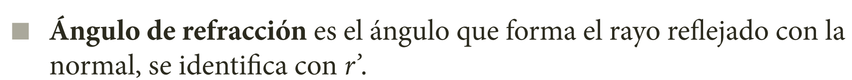
3.1 Refracción de la luz

Cuando llega la onda de luz a la frontera entre dos medios, una parte de ella se refleja y la otra se transmite. La característica más llamativa de esta onda que es transmitida al otro lado de la superficie de la frontera, es que sus rayos no conservan la misma dirección que los de la onda incidente. Este fenómeno en el que se presenta la flexión de los rayos en la transmisión de ondas se denomina **refracción**.

Cuando la luz cambia de medio, su velocidad de propagación cambia, en cuanto a magnitud y dirección, de acuerdo con las características del medio. Por ejemplo, cuando un rayo de luz pasa del medio aire al medio agua, cambia su dirección acercándose a la normal y disminuyendo su rapidez de propagación. Es por esto que si estamos en el medio aire y observamos a un objeto sumergido en agua lo vemos de mayor tamaño y más cercano comparado a la observación hecha si el objeto está en el mismo medio, aire, como se observa en la figura 14.

Para describir de forma geométrica la refracción de la luz, es conveniente definir los siguientes elementos, que se ilustran en la siguiente figura:

- El **rayo incidente** es el rayo que llega o incide en la frontera de los medios.
- El **rayo refractado** es el rayo que se transmite por el segundo medio, una vez llega a la frontera.
- La **normal** es la recta perpendicular a la línea que divide los dos medios, es decir, la superficie del segundo medio.
- **Ángulo de incidencia** es el ángulo que forma el rayo incidente con la normal, se denota con la letra *i*.
- **Ángulo de refracción** es el ángulo que forma el rayo reflejado con la normal, se identifica con *r'*.



Al igual que en la reflexión, el rayo incidente, la normal y el rayo reflejado se encuentran en un mismo plano.

3.1.1 La ley de la refracción

La experiencia muestra que los rayos incidentes y refractados cumplen las siguientes leyes:

- Cada rayo de onda incidente y el correspondiente rayo de la onda transmitida forman un plano que contiene a la recta normal a la superficie de separación de los dos medios.
- La relación entre los senos de los ángulos de incidencia y de refracción es una relación constante e igual al cociente entre la velocidad con que se propaga la luz en el primer medio y la velocidad con que se propaga en el segundo medio.

$$\frac{\text{sen } \theta_i}{\text{sen } \theta_r} = \frac{v_1}{v_2}$$

Por lo tanto, en términos de los ángulos que forman los rayos incidente y refractado con la normal, obtenemos:

$$\frac{\text{sen } i}{\text{sen } r} = \frac{v_1}{v_2}$$

Definición

El índice de refracción, n, se define como el cociente entre la rapidez c, de la luz en el vacío y la rapidez v, de la luz en otro medio.

La anterior se expresa matemáticamente como:

$$n = \frac{c}{v}$$

El índice de refracción siempre es mayor que 1, y varía ligeramente con la temperatura y la longitud de onda de la luz; este fenómeno origina la dispersión de la luz.

Podemos encontrar una expresión que relacione los índices de refracción de dos medios, con la velocidad de la luz en dichos medios. Si en el medio 1 la velocidad de la luz es v_1 y su índice de refracción es n_1 y, en el medio 2 la velocidad de la luz es v_2 y su índice de refracción es n_2 entonces:

$$n_1 = \frac{c}{v_1} \text{ y } n_2 = \frac{c}{v_2}$$

$$v_1 = \frac{c}{n_1} \text{ y } v_2 = \frac{c}{n_2}$$

Como,

$$\frac{\text{sen } i}{\text{sen } r'} = \frac{v_1}{v_2}$$

Entonces,

$$\frac{\text{sen } i}{\text{sen } r'} = \frac{\frac{c}{n_1}}{\frac{c}{n_2}} = \frac{n_2}{n_1}$$

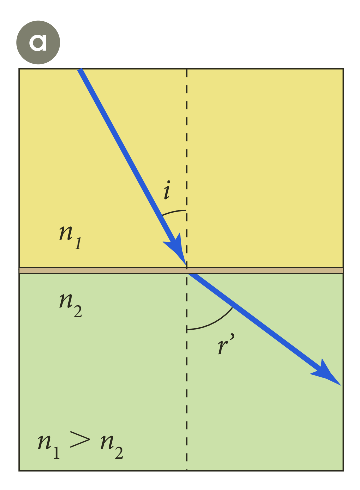
$$\frac{\text{sen } i}{\text{sen } r'} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}$$

Por lo tanto, podemos escribir las ecuaciones como:

$$\frac{\text{sen } i}{\text{sen } r'} = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}$$

En la figura 15a se muestra un rayo de luz que al refractarse aumenta su velocidad, $v_1 < v_2$, observa que el rayo refractado se aleja de la normal, $i < r'$. El índice de refracción del medio 1 es mayor que el del medio 2, $n_1 > n_2$. La figura 15b muestra un rayo de luz que al refractase disminuye su velocidad, $v_1 > v_2$, observa que el rayo refractado se acerca a la normal, $i > r'$. El índice de refracción del medio 1 es menor que el del medio 2, $n_1 < n_2$.



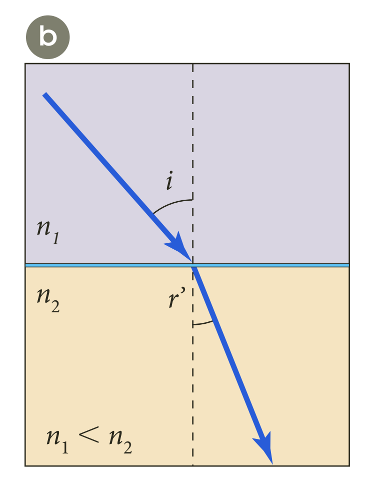


Figura 15. Relación entre los índices de refracción de dos medios: a) Si n_1• n_2 la velocidad del rayo refractado es mayor que la del rayo incidente. b) Si $n_1 < n_2$ la velocidad del rayo refractado es menor que la del rayo incidente.

EJEMPLO

Se tiene una lámina de vidrio con forma de prisma rectangular. Un rayo de luz incide en una de sus caras con un ángulo de incidencia de 30°, el rayo de luz se refracta, atraviesa la lámina y vuelve a refractarse saliendo de nuevo al aire. Encontrar:

a. Los ángulos de refracción en las dos fronteras (aire-vidrio, vidrio-aire).
b. La velocidad de la luz en el vidrio.
c. La relación existente entre el ángulo de incidencia de la luz en la lámina y el ángulo con el que sale de la lámina.
d. El esquema que describe la situación.

Solución:

a. Como el índice de refracción del vidrio es 1,5 entonces, tenemos:

$$\frac{\text{sen } i}{\text{sen } r'} = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\frac{\text{sen } 30°}{\text{sen } r'} = \frac{1,5}{1,0003} \quad \textit{Al remplazar}$$

$$\frac{\text{sen } 30° \cdot 1,0003}{1,5} = \text{sen } r' \quad \textit{Al despejar sen r'}$$

$$r' = 19,48° \quad \textit{Al calcular}$$

Si el rayo se refracta del vidrio al aire:

$$\frac{\text{sen } 19,48°}{\text{sen } r'} = \frac{1,0003}{1,5} \quad \textit{Al remplazar}$$

$$r' = 30° \quad \textit{Al calcular}$$

El rayo al pasar de aire al vidrio se refracta con un ángulo de 19,48° y al pasar de vidrio al aire con 30°.

b. Para hallar la velocidad de la luz en el vidrio:

$$n = \frac{c}{v}$$

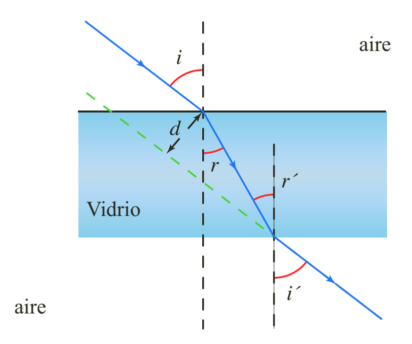
$$1,5 = \frac{3,00 \times 10^8 \text{ m/s}}{v} \quad \textit{Al remplazar}$$

$$v = \frac{3,00 \times 10^8 \text{ m/s}}{1,5} = 2,00 \times 10^8 \text{ m/s}$$

La velocidad de la luz en el vidrio es 200 millones de m/s.

c. El ángulo con el que incide la luz en la lámina es igual al ángulo con el que sale de la lámina: 30°.

d. Al observar un objeto a través de una lámina de vidrio, la imagen se desplaza un poco con respecto a la observación hecha sin vidrio. A mayor espesor mayor desviación.

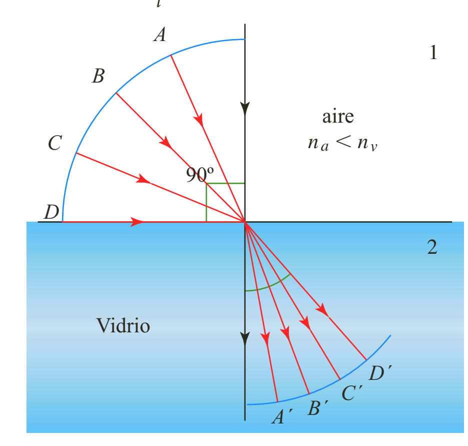


3.1.2 Refracción y reflexión total

Cuando un rayo de luz pasa de un medio a otro cuyo índice de refracción es mayor, por ejemplo del aire al vidrio, los rayos refractados se acercan a la normal con respecto a los rayos incidentes. Si el ángulo de incidencia es de 90° el ángulo de refracción se denomina **ángulo límite** y lo denotamos como r'_l.

En la siguiente figura se representan varios rayos *(A, B, C* y *D)* que inciden desde el aire hacia el vidrio.

Se puede observar que todos los rayos que penetran en el segundo medio, están contenidos en un cono cuyo ángulo del vértice es el ángulo límite.



Según la ley de Snell, el ángulo límite para el cual ocurre este fenómeno, se expresa como:

$$\frac{\text{sen } 90°}{\text{sen'}_l} = \frac{n_2}{n_1}$$

es decir,

$$\text{sen'}_l = \frac{n_1}{n_2}$$

Por el contrario, si el índice del segundo medio es menor, como del vidrio al aire, los rayos refractados se alejan de la normal, como se muestra en la figura 16.

Observa que el rayo refractado se propaga en dirección paralela a la superficie. Si el ángulo de incidencia es mayor que el ángulo límite, toda la luz se refleja y se produce entonces la **reflexión total**. En este caso, el ángulo límite, i_l, según la ley de Snell es:

$$\frac{\text{sen } i_l}{\text{sen } 90°} = \frac{n_2}{n_1}$$

y por tanto,

$$\text{sen } i_l = \frac{n_2}{n_1}$$

Un fenómeno que tiene mucha relación con la reflexión total es el de los espejismos. Estos se producen cuando el índice de refracción de un medio cambia en cierta dirección, dando origen a una refracción continua de los rayos luminosos y, por tanto, a una desviación de la trayectoria rectilínea inicial. Así, en los días calurosos, el aire que se encuentra justo encima de la superficie terrestre presenta un menor índice de refracción que el aire de las capas superiores, por lo que da la impresión de la existencia de agua en el suelo y de comportarse de manera similar a un espejo.

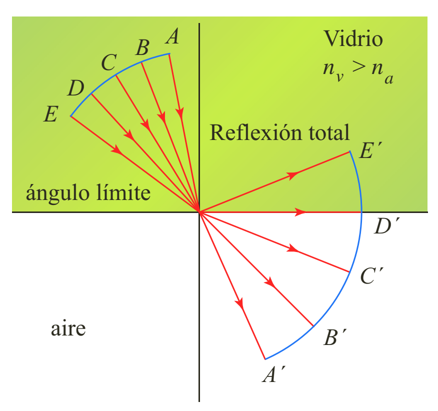
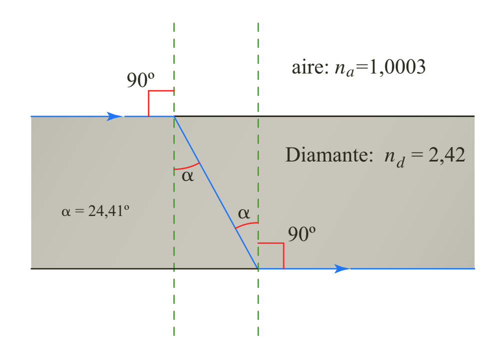


Figura 16. Al hacer incidir el rayo de luz del vidrio sobre el aire, como el índice del segundo medio es menor que el del primer medio, se presenta la reflexión total.

✱ EJEMPLO

Si se tiene una placa de diamante cuyas caras son paralelas, ¿cuál debe ser el ángulo de incidencia para que el rayo no emerja por su cara opuesta?



Solución:

Apoyándonos en la gráfica, debemos hallar el ángulo límite de incidencia para que el rayo no se refracte al pasar del diamante al aire sino que se produzca reflexión total.

$$\text{sen } i_l = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\text{sen } i_l = \frac{1{,}0003}{2{,}42} \qquad \textit{Al remplazar}$$

$$i_l = 24{,}41° \qquad \textit{Al despejar } i_l \textit{ y calcular}$$

Como este ángulo es el ángulo de refracción cuando el rayo incide a la lámina, el ángulo de incidencia es:

$$\frac{\text{sen } i}{\text{sen } r'} = \frac{n_2}{n_1} \qquad \textit{Al remplazar,}$$

$$\frac{\text{sen } i}{\text{sen } 24{,}41} = \frac{2{,}42}{1{,}0003} \qquad \textit{Al despejar i y calcular } i = 90°$$

Como el ángulo de incidencia, *i*, no puede ser mayor de 90°, por tanto el rayo se propaga paralelo a la superficie. Entonces el ángulo límite de refracción es igual al ángulo límite de incidencia.

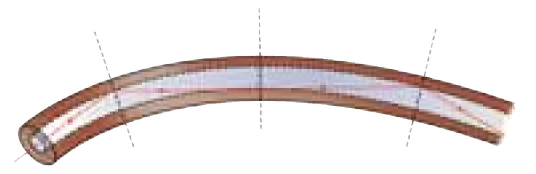


Figura 17. La fibra óptica es una de las aplicaciones de la propiedad de reflexión total.

3.2 Algunas aplicaciones de la refracción

3.2.1 Fibra óptica

Probablemente has escuchado mencionar la fibra óptica y sabes que la señal de la televisión por cable es más nítida, si se utiliza una conexión de este tipo. La propiedad de reflexión total es el principio de la fibra óptica y equivale a entubar la luz de un lugar a otro, a través, de una fibra de vidrio o en barras de plástico que están revestidas por una sustancia cuyo índice de refracción es menor. Cuando la luz penetra en el núcleo del tubo se dirige hacia el límite de las dos sustancias, en donde se produce una reflexión total que al volver a chocar contra el límite entre los medios, vuelve a reflejarse totalmente siguiendo una trayectoria en zigzag y avanzando a lo largo del tubo (figura 17).

Si se usan dos conjuntos de fibras en condiciones especiales es posible transmitir luz a través de uno de los conjuntos y devolverla por el otro. Para que la imagen sea clara, se requiere que las fibras sean paralelas entre sí, y entre más fibras haya y más pequeñas sean, más detallada será la imagen.

Este principio es utilizado por los endoscopios, instrumentos médicos que permiten observar órganos como el hígado o el estómago, y que en menor tamaño se pueden introducir en los vasos sanguíneos o por la uretra.

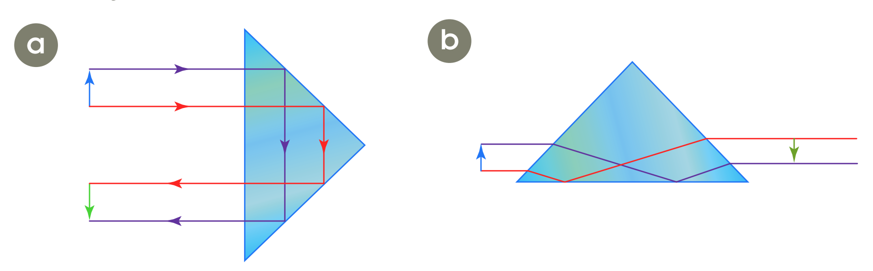
En la comunicación, la fibra óptica ha desplazado a los gruesos, voluminosos y costosos alambres de cobre porque a diferencia de la electricidad, la luz no se afecta mucho con los cambios de temperatura y las fluctuaciones de los campos eléctricos vecinos, por lo que la señal es más clara. De esta manera, gran parte del mundo está remplazando los circuitos eléctricos por los circuitos ópticos.

3.2.2 El prisma óptico

Un prisma es un medio transparente limitado por dos caras no paralelas, el cual refleja el 100% de la luz que incide sobre él, contrariamente a los espejos plateados o aluminados que sólo reflejan el 90%. Esta es la razón por la que en muchos instrumentos ópticos se usan los prismas en lugar de los espejos.

En la siguiente figura, se representa la incidencia de un rayo de luz sobre un prisma. La parte a de la figura, muestra que la dirección del rayo reflejado que emerge sufre una desviación de 180° con respecto al rayo incidente, mientras en la parte b, se observa que no cambia la dirección del rayo. Sin embargo, en todos los casos, la dirección de la imagen es distinta a la del objeto.

Los prismas ópticos se utilizan en aparatos como los binoculares, en donde se usan pares de prismas para alargar el recorrido de la luz y así obtener una imagen derecha.





3.3 Dispersión de la luz

3.3.1 Descomposición de la luz

Cuando un rayo de luz solar, llamada luz visible, atraviesa un medio transparente que no sea el vacío, aparece una serie de colores. Este fenómeno llamó la atención de Newton, quien intentó determinar el porqué de la aparición de dichas franjas de colores en las lentes utilizadas en los telescopios, fenómeno denominado **aberración cromática**.

Después de varios experimentos, Newton hizo pasar un rayo de luz blanca por un prisma óptico y consiguió una banda de colores que iba desde el color rojo hasta el violeta a la que llamó **espectro**. Si hacía pasar uno de estos colores por otro prisma obtendría luz del mismo color; pero si colocaba el prisma invertido y hacía pasar por él todos los colores a la vez, obtendría de nuevo luz blanca.

El fenómeno que permite descomponer la luz blanca en luces de distintos colores se denomina **dispersión de la luz** (figura 18). Debido a que la luz está conformada por un conjunto de radiaciones, cada una de ellas con una longitud de onda diferente, su velocidad de propagación es diferente para cada medio transparente, cuyo índice de refracción es diferente para cada color.

Cuando la luz blanca atraviesa un prisma óptico, el ángulo de desviación de cada radiación será diferente, siendo el mayor el de la luz violeta y el menor el de la luz roja y los otros colores tienen ángulos de desviación que se ubican entre estos dos colores.

El prisma se utiliza para realizar la dispersión de la luz blanca en sus varios componentes espectrales. A su vez el prisma sirve en los espectrómetros para estudiar las longitudes de onda emitidas por una fuente de luz, como la lámpara de sodio. Uno de los usos de estos espectrómetros de prisma es la identificación de gases. El sodio por ejemplo, emite dos longitudes de onda que se observan como dos líneas amarillas muy juntas. Así, si un gas emite estos colores se puede decir que tiene sodio como uno de sus componentes.

La dispersión de la luz explica la aparición, en el cielo, del arco iris con todos sus tonos: desde el rojo hasta el violeta.



Figura 18. La luz blanca se descompone en varios colores al atravesar un medio transparente diferente al vacío.

3.3.2 El arco iris

El arco iris es un fenómeno natural que se forma por causa de la dispersión de la luz. Para observarlo, el Sol debe iluminar una parte del cielo, las nubes deben tener gotas de agua o deben estar cayendo en la parte contraria del cielo iluminado. Cada una de las gotas esféricas de agua actúan como prismas produciendo de esta manera la dispersión de la luz.

Cuando la luz incide en la gota, una parte se refleja y otra se refracta al atravesarla. El rayo que se refracta, incide con la pared de la gota, reflejándose de nuevo y transmitiéndose al aire, mientras el rayo que se refleja provoca una inversión. Por esta razón, en ocasiones se observa un segundo arco con los colores invertidos, denominado arco iris secundario.

La verdad es que si no fuera por la superficie terrestre el arco iris lo percibiríamos circular, aunque desde un avión en pleno vuelo se puede observar el arco iris completamente circular.

3.3.3 El color del cielo

La luz solar al igual que el resto de la radiación electromagnética que emite, llega a la atmósfera terrestre después de propagarse por el espacio vacío. La atmósfera es transparente a las ondas de baja frecuencia, a la luz visible y a la radiación ultravioleta de mayor frecuencia. Durante el día, todo el cielo se observa iluminado, no sólo las regiones próximas al Sol. Esto se debe a la forma en que la luz se dispersa en la atmósfera.

En la Luna, donde prácticamente no hay atmósfera, durante el día brilla el Sol rodeado de un cielo negro.

La radiación que llega a la atmósfera terrestre tiene toda la gama de las ondas electromagnéticas. La atmósfera, por ejemplo, es opaca a los rayos ultravioleta de alta frecuencia y transparente a la luz visible. Sin embargo, los elementos presentes en la atmósfera, tales como el oxígeno y el nitrógeno, dispersan principalmente el color violeta, seguido del azul, el verde, el amarillo, el naranja y el rojo. Como nuestros ojos son muy sensibles a la frecuencia de la luz azul, observamos la dispersión azul y no violeta. Así notamos la tonalidad del cielo de color azul.





El color del cielo varía a lo largo del día. Por ejemplo, al atardecer y al anochecer, el Sol y las zonas cercanas al horizonte se observan rojizas. Esto se debe a que en esos momentos los rayos del Sol llegan en forma inclinada a la Tierra y, en consecuencia, deben atravesar un mayor espesor de la atmósfera. La luz que nos llega en el ocaso ha perdido, por dispersión de la atmósfera, gran parte de sus componentes azul y violeta. Como las frecuencias más bajas interactúan menos con la materia, estas siguen su camino en forma más directa y llegan casi sin dispersarse hasta nuestros ojos. Este color rojizo del cielo se conoce como crepúsculo.

Cuando la atmósfera contiene polvo u otros materiales en grandes cantidades, estas partículas dispersan las frecuencias menores de la luz, es decir, el amarillo y el rojo, como consecuencia el aspecto del cielo es blanquecino.

Sobre las grandes ciudades se observa una bruma grisácea debido a las partículas que emiten los carros y las fábricas. Unas partículas dispersan la luz y las más grandes la absorben, en consecuencia, se produce una bruma café.

En Bogotá, en la primera y segunda semanas de enero esta bruma se disminuye bastante, porque muchos de sus habitantes salen de viaje o a visitar a sus familias fuera de la ciudad y se produce una gran disminución de tráfico. Si el motor de un auto familiar emite más de 100 mil partículas por segundo, a marcha mínima, ¿te imaginas cuántas partículas producen las fábricas y todos los autos que a diario circulan por las calles de una ciudad? No en vano los defensores del medio ambiente luchan por reducir el uso de los automóviles con motor de diesel y gasolina, mejorar los estándares de calidad de las fábricas y motivar a la gente por el uso de energías alternativas: como la solar y la eólica.

3.4 El color

Ya hemos visto que la luz blanca contiene todos los colores, pero que al hacer converger todos los colores en un mismo punto, la luz que se obtiene es de nuevo blanca. Esto significa que podemos combinar luces de colores y obtener luz de otro color. La figura 19 muestra tres colores de luz: roja, azul y verde; observa que la mezcla de las tres produce luz blanca, la luz roja y la azul forman luz magenta, el verde y azul forman el cian o turquesa y, el rojo y la luz verde forman luz amarilla.

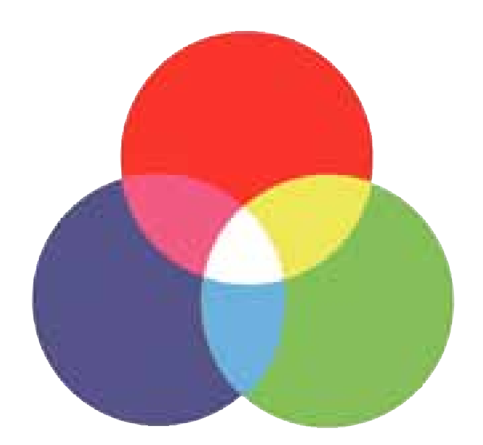


Figura 19. Al mezclar los colores primarios de la luz: rojo, azul y verde, se produce luz blanca.

Por todo lo expuesto anteriormente a los colores verde, rojo y azul se les denomina colores primarios y a los colores que resultan al superponerlos se les conoce como secundarios. Esta mezcla de colores recibe el nombre de mezcla por adición. Cuando el color de una luz se suma con otro y resulta blanco, se dice que estos dos colores son complementarios, como por ejemplo, el magenta con el verde.

En los escenarios utilizan las luces complementarias, debido a que al iluminar a los actores con luz azul y amarilla, por ejemplo, parecen iluminados por luz blanca, aunque sus sombras se observen de color azul o amarilla.

Pero, ¿por qué los objetos al iluminarlos con luz blanca no se ven blancos? Cuando la luz incide en la frontera de dos medios una parte se refleja y otra se transmite, o es absorbida por el medio. El color de un material es la luz reflejada. Por ejemplo, al iluminar con luz blanca una planta la vemos verde, debido a que su superficie absorbe todas las otras frecuencias de la luz y refleja la frecuencia de la luz verde.

Si iluminamos la planta con luz azul la observaremos muy oscura, pues su superficie absorbe la luz azul. Cuando se ilumina con luz blanca y se observa de color negro, significa que casi toda la luz fue absorbida por esta superficie y no refleja ningún color.

Los colores primarios de los pigmentos utilizados por un pintor son diferentes a los colores primarios de la luz. Los colores primarios de los pigmentos son los colores secundarios de la luz: el magenta, el turquesa y el amarillo. Al mezclar los colores primarios de los pigmentos, se obtienen los colores secundarios de los pigmentos: el magenta y el amarillo producen el color rojo, el magenta y el turquesa producen el color azul y el turquesa y el amarillo producen el color verde (figura 20). Al mezclar los tres colores primarios de los pigmentos, se produce el negro; es decir, esta mezcla absorbe toda la luz que le llega, no hay reflexión.

La diversidad de colores en una pintura o fotografía se debe a la mezcla de estos colores. Por ejemplo, una impresora de chorro deposita en el papel diferentes proporciones de colores magenta, amarillo, cian y negro para obtener toda la gama de colores posibles.

Al observar el mar o la superficie de un lago observamos tonalidades de color azul, aunque este no es su color, el color azul se debe al reflejo del cielo. Si se vierte esta agua en un recipiente blanco la tonalidad cambia a un azul verdoso pálido.

El agua es transparente a la luz blanca, pero sus moléculas adquieren cierta resonancia con la frecuencia de la luz roja, de tal forma que esta luz se absorbe más que el resto de las frecuencias. Si el agua absorbe el rojo se refleja entonces su color complementario que es el cian, un azul verdoso.

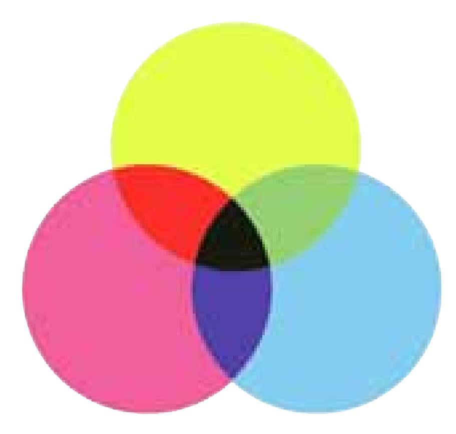


Figura 20. Al mezclar los colores primarios de los pigmentos: magenta, turquesa y amarillo, se produce el color negro.

4. Instrumentos ópticos

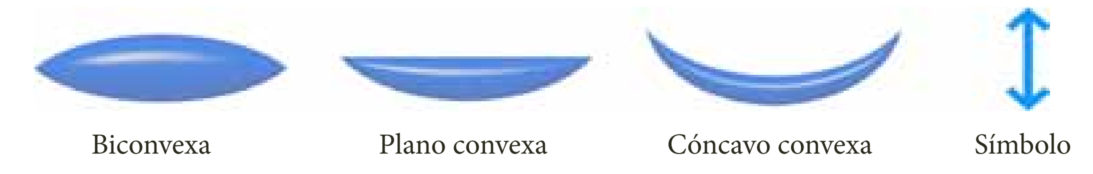
4.1 Las lentes

Las lentes son medios materiales transparentes, como el vidrio o el plástico, cuyas superficies pueden ser curvas, planas o una combinación de las dos. Por su forma, las lentes pueden ser **esféricas** si pertenecen a una porción de esfera, o **cilíndricas**, si esas superficies son una porción de cilindro. Sin embargo, es más frecuente clasificarlas como convergentes y divergentes.

Definición

Una lente es convergente si al incidir en ella rayos de luz paralelos, los reemite de tal forma que convergen en un mismo punto. Estas lentes son más gruesas en el centro que en los extremos.

En la siguiente figura, se muestran las diferentes formas de lentes convergentes.

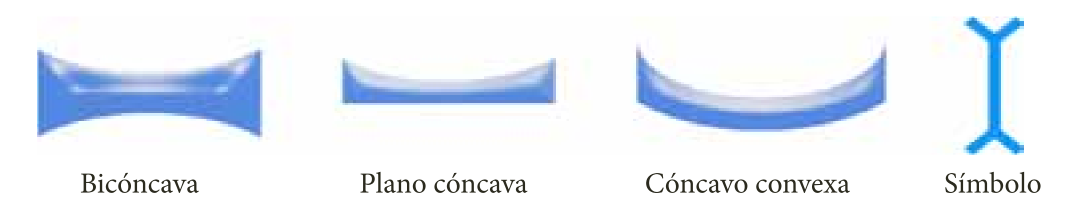


Biconvexa — Plano convexa — Cóncavo convexa — Símbolo

Definición

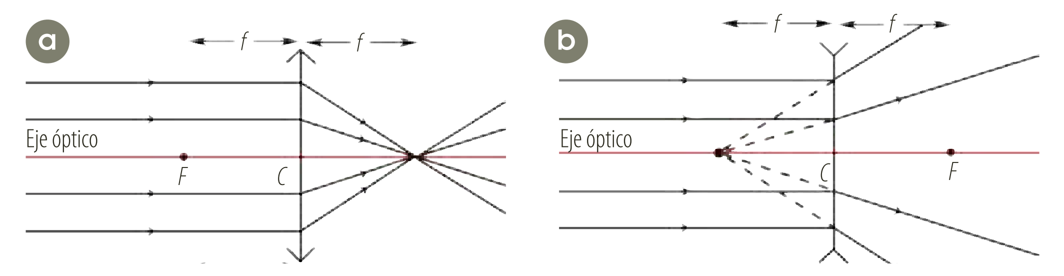
Una lente es divergente si al incidir en ella rayos de luz paralelos, los reemite de tal forma que divergen completamente, como si provinieran de un mismo punto. Estas lentes son angostas en el centro y más gruesas en los extremos.

A continuación se representan diferentes formas de lentes divergentes.



Bicóncava — Plano cóncava — Cóncavo convexa — Símbolo

A partir de la siguiente figura se pueden apreciar los elementos de una lente (en la parte *a* se muestra la convergencia de los rayos y en la parte *b* la divergencia):



- Los **focos**, *F*, de la lente son los puntos donde convergen los rayos paralelos que inciden sobre ella (si la lente es convergente), o es el punto que resulta de la proyección de los rayos que emergen de ella (si la lente es divergente), en este caso el foco es virtual.
- El **eje de la lente** es la línea que une los dos focos de la lente.
- El **centro óptico**, *C*, es el punto ubicado en medio de los dos focos.
- La **distancia focal**, *f*, es la distancia de *C* a un foco.

- Los **planos focales** son los planos perpendiculares al eje óptico que pasan por los focos. El **plano focal objeto** contiene todos los puntos cuyas imágenes se encuentran en el infinito del espacio imagen, mientras el **plano focal imagen** contiene todos los puntos que son imagen de algún punto del infinito del espacio objeto.

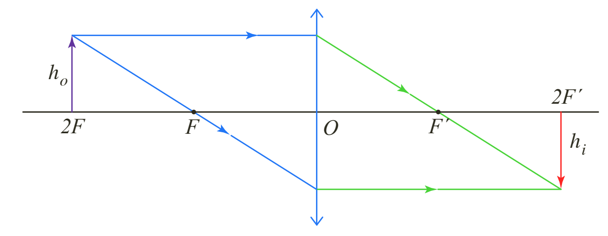
4.1.1 Construcción de imágenes en lentes convergentes

Considerando las definiciones anteriores, se pueden dibujar varios rayos:

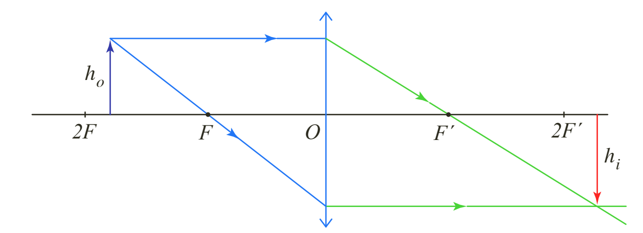
- Un rayo que partiendo del objeto se dirige al centro óptico *(C)*, para atravesarlo sin experimentar ninguna desviación.
- Un rayo que partiendo del objeto, se propaga paralelo al eje de la lente, de tal manera que al refractarse pasa por el foco *F*.
- Un rayo que partiendo del objeto se propaga pasando por el foco *F'* y llega hasta la lente, para refractarse paralelo al eje de la lente.

A continuación se representará la imagen producida por una lente convergente cuando se coloca en varias posiciones diferentes:

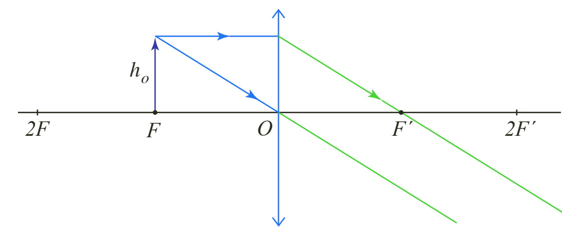
- Cuando el objeto (h_0) está situado en el doble de la distancia focal, la imagen (h_i) es real, invertida de igual tamaño y aparece a una distancia el doble de la distancia focal.



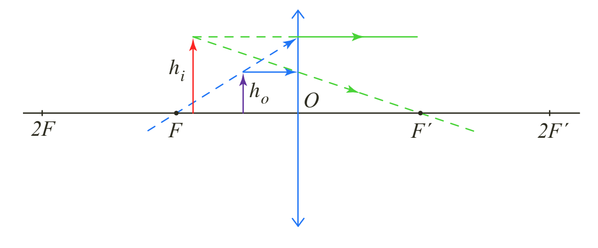
- Cuando el objeto (h_0) se encuentra ubicado entre una y dos veces la distancia focal, la imagen (h_i) es real invertida, mayor que el objeto y aparece a una distancia mayor que el doble de la distancia focal.



- Cuando el objeto (h_0) se encuentra ubicado en el foco, la imagen (h_i) se forma en el infinito.



- Cuando el objeto (h_0) está entre la lente y el foco, la imagen (h_i) formada es virtual, derecha y de mayor tamaño.



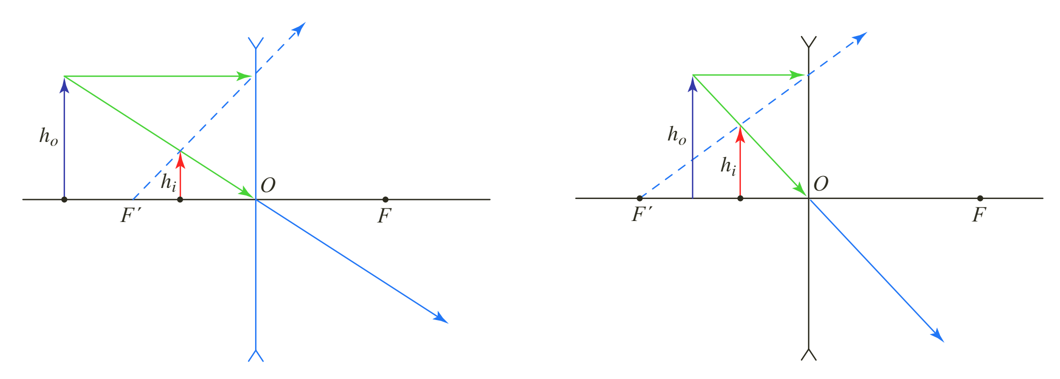
4.1.2 Construcción de imágenes en lentes divergentes

Las imágenes de las lentes divergentes siempre son virtuales, derechas y de menor tamaño que el objeto. Por esto las posiciones de *F* y *F'* se invierten, con respecto a la lente convergente.

Se procede en la misma forma que con las lentes convergentes, pero debido a que los rayos emergen de la lente en forma divergente, se debe tener en cuenta que:

- Un rayo que parte del objeto, atraviesa la lente por el centro sin experimentar ninguna desviación.
- Un rayo que parte del objeto y se propaga paralelo al eje óptico de la lente, se refracta alejándose de *F* y su prolongación pasa por *F'*.
- Un rayo que parte del objeto, que se propaga en dirección al foco *F'*, se refracta paralelo al eje óptico.

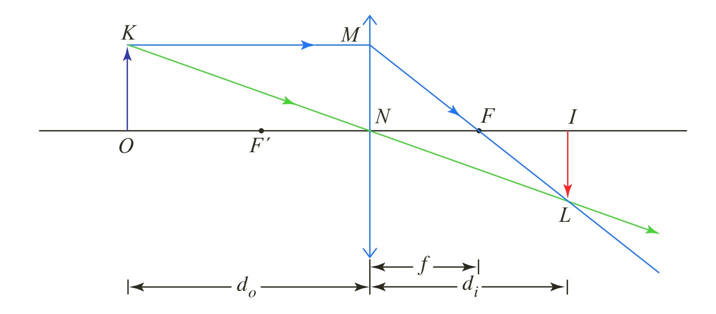
En la siguiente figura, se muestra la imagen producida por una lente divergente cuando un objeto se coloca en dos posiciones diferentes (a una mayor distancia focal entre la lente y el foco).



4.1.3 Ecuación de las lentes

Es posible encontrar una ecuación que relaciona la distancia de la imagen al centro de la lente d_i, la distancia del objeto al centro de la lente d_0, el tamaño o altura de la imagen h_i, el tamaño o altura del objeto h_0 y la distancia focal *f*.

En la siguiente figura se han trazado rayos, el que llega paralelo al eje *y* se desvía pasando por el foco y el que pasa por el centro de la lente.



Se puede observar que los triángulos *MNF* y *LIF* son semejantes, debido a que sus respectivos ángulos *F* son opuestos por el vértice, por tanto,

$$\frac{h_i}{h_0} = \frac{d_i - f}{f}$$

También son semejantes los triángulos *LIN* y *KON*, ya que sus respectivos ángulos *N* son opuestos por el vértice, entonces se puede establecer la proporción:

$$\frac{h_i}{h_0} = \frac{d_i}{d_0}$$

$$\frac{d_i - f}{f} = \frac{d_i}{d_0}$$

$$\frac{1}{f} - \frac{1}{d_i} = \frac{1}{d_0}$$

Al reorganizar los términos encontramos la ecuación para las lentes:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{d_0} + \frac{1}{d_i}$$

El aumento de la lente se refiere a la relación entre la altura, o tamaño de la imagen con respecto a la del objeto, es decir,

$$\frac{h_i}{h_0} = -\frac{d_i}{d_0}$$

El signo menos resulta de las convenciones de signos que a continuación se describen:

- La distancia focal es positiva para lentes convergentes y negativa para lentes divergentes.
- La distancia objeto es positiva, si el objeto se encuentra al lado del que proviene la luz. En otro caso es negativa.
- La distancia imagen es positiva, si se encuentra en el lado opuesto de la lente, de donde proviene la luz.
- Las alturas o los tamaños del objeto y la imagen, h_0 o h_i respectivamente, son positivas, si se encuentran por encima del eje óptico. Si están por debajo del eje óptico son negativas.

Los optómetras y los oftalmólogos no usan la distancia focal sino su recíproco para especificar la intensidad (poder de convergencia o divergencia) de las lentes para anteojos o para lentes de contacto. A esta cantidad se le conoce como potencia de la lente y se simboliza con la letra *P*. La unidad de la potencia de una lente es la dioptría, una dioptría equivale a 1 m^{-1}. La expresión potencia de una lente es:

$$P = \frac{1}{f}$$

Con frecuencia se utilizan dos o más lentes alineadas para obtener una potencia diferente, en este caso, la potencia total del sistema está dada por la expresión:

$$P = \frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} = P_1 + P_2$$

Cuando las lentes no están yuxtapuestas su expresión es:

$$P = P_1 + P_2 - d \cdot P_1 \cdot P_2$$

donde *d* es la distancia entre las lentes.

EJERCICIO

Un objeto de 1 cm de altura, se coloca a 3 cm de una lente convergente de 20 dioptrías. ¿Cuál es la posición de la imagen?

EJEMPLO

En un proyector se utiliza una lente convergente cuya potencia es de 10 dioptrías. Si se desea que al proyectar las diapositivas sobre una pared, estas adquieran un tamaño 59 veces la diapositiva:

a. ¿Cuál debe ser la distancia de la diapositiva con respecto a la lente?

b. ¿Cuál debe ser la distancia del proyector a la pared, si se toma como referencia la lente?

Solución:

a. En las lentes convergentes cuando la imagen es real, es invertida, para saber la distancia que debe existir entre la diapositiva y la lente se tiene que:

$$\frac{h_i}{h_0} = -\frac{d_i}{d_0}$$

$$-59 = -\frac{d_i}{d_0}$$ *Al remplazar*

$$59\,d_0 = d_i$$ *Al despejar d_i*

Como la potencia de la lente está dada por la expresión:

$$P = \frac{1}{f}$$

$$f = \frac{1}{P}$$ *Al despejar f*

$$f = \frac{1}{10\text{ m}^{-1}}$$ *Al remplazar*

$$f = 0{,}1\text{ m}$$ *Al calcular*

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{d_0} + \frac{1}{d_i}$$

$$\frac{1}{0{,}1\text{ m}} = \frac{1}{d_0} + \frac{1}{59\,d_0}$$ *Al remplazar*

$$\frac{1}{0{,}1\text{ m}} = \frac{60}{59\,d_0}$$ *Al calcular*

$$d_0 = \frac{6}{59}\text{ m} \approx 10{,}17\text{ cm}$$ *Al despejar d_0 y calcular*

La diapositiva debe estar a 10,17 cm de la lente.

b. La distancia de la lente a la pared está dada por:

$$\frac{h_i}{h_0} = -\frac{d_i}{d_0}$$

$$-59 = -\frac{d_i}{\frac{6}{59}\text{ m}}$$ *Al remplazar*

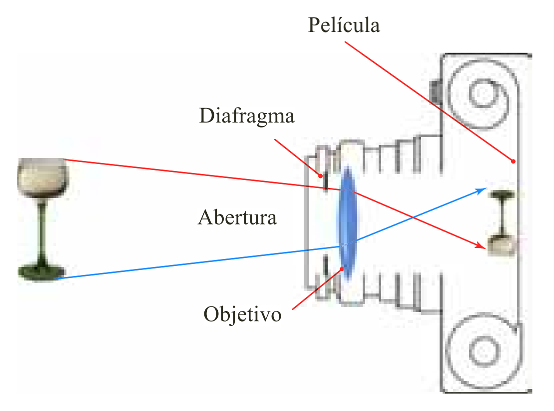
$$6\text{ m} = d_i$$ *Al despejar d_i y calcular*

El proyector debe estar a 6 m de la pared.

4.2 Cámara fotográfica

Una cámara fotográfica es una caja hermética a la luz que usa una lente o una combinación de lentes para formar una imagen real e invertida sobre una película sensible a la luz. La luz de esta imagen afecta las sustancias químicas de la película, de tal modo, que la imagen queda registrada permanentemente. En la siguiente figura se representa la formación de una imagen por una cámara fotográfica.

La cámara tiene un obturador que deja pasar la luz a través de la lente por un tiempo muy corto. Para que la fotografía sea de mejor calidad se deben controlar tres aspectos: la rapidez del obturador, el grado de abertura del diafragma y el enfoque.



- **Rapidez del obturador:** cuando la cámara y el objeto se desplazan relativamente, es necesario que el obturador permanezca el mínimo tiempo abierto con el fin de congelar el movimiento en un instante y evitar que la foto sea borrosa.

  El obturador debe permanecer abierto un tiempo máximo de $\frac{1}{100}$ s.

- **Grado de abertura del diafragma:** se debe controlar la cantidad de luz que llega a la película para evitar que quede oscura o, por el contrario, con demasiada luz, de tal forma que todos los objetos brillantes se ven iguales con poco contraste. Este control lo hace un diafragma de iris que se coloca detrás de la lente. Su abertura está de acuerdo con la intensidad de la luz del exterior (a mayor intensidad menor abertura), la sensibilidad de la película y la rapidez del obturador (a mayor rapidez mayor abertura del diafragma).
- **Enfoque:** como la película es la pantalla de la imagen, esta debe colocarse en el lugar justo para mayor nitidez. Según lo que hemos estudiado sobre las lentes convergentes, si el objeto se sitúa en el infinito la película debe colocarse a la mínima distancia con respecto a la lente, que es su distancia focal. Si el objeto se acerca la película debe alejarse, este efecto se logra cuando se hace girar un anillo sobre la lente.

Por otra parte, en una cámara digital las imágenes son capturadas por un sensor electrónico que dispone de muchas unidades fotosensibles y desde allí se archivan en otro elemento electrónico denominado memoria. La cámara dispone de una pantalla y las fotos que se acaban de tomar se pueden ver por medio de ella. Se pueden conectar a un ordenador y hacerles retoques de brillo, ampliarlas, reducirlas, corregir colores, etc.

A continuación realizaremos un esquema del funcionamiento de una cámara digital:

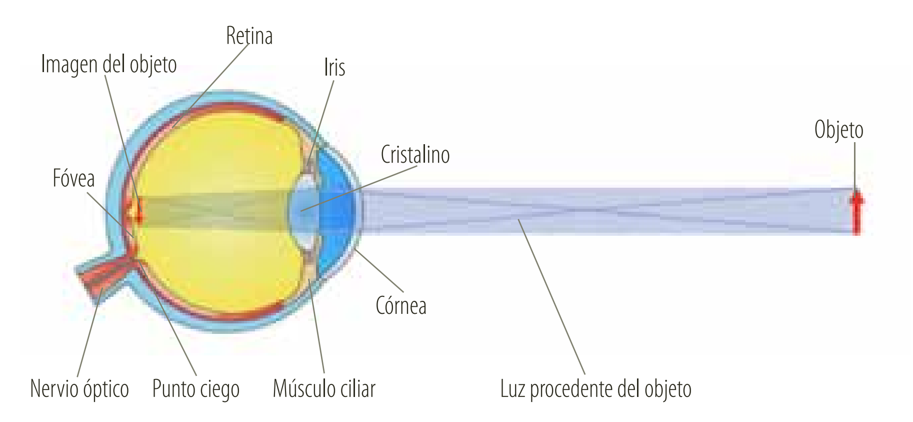
- Se activa la cámara.
- Se ajustan los parámetros de la cámara, como son el *flash,* el dispositivo de resolución, etc.
- Se enfoca el objeto que se va a fotografiar y se pulsa el botón disparador.
- La luz reflejada por el objeto entra a través de la lente de la cámara.
- La luz incide sobre el CCD (chip semiconductor sensible) que contiene múltiples elementos sensibles a la luz descomponiéndola en rojo, verde y azul.
- La cantidad de luz reflejada se convierte en una señal eléctrica analógica y se transfiere a la parte electrónica de la cámara.
- Mediante el software interno de la cámara, la imagen tomada se comprime y se almacena sobre una memoria de tipo flash, disco duro o disquete. Al conectar la cámara a la PC se pueden transferir las imágenes.

Según los expertos, la fotografía clásica tiene mejor resolución y presenta menos deficiencias que la fotografía digital.

Además de ser una aplicación de la reflexión de la luz, la fotografía es un proceso fotoquímico y se produce por descomposición de los halogenuros de plata, debido a la luz. El cloruro de plata (blanco) y el bromuro de plata (amarillo) se ennegrecen cuando incide la luz sobre ellos. Ambos son compuestos iónicos y la luz les proporciona la energía necesaria para que se produzcan transformaciones químicas.

4.3 El ojo humano

La cámara fotográfica es una mala copia de nuestros ojos. El ojo es el órgano receptor responsable de la función de la visión. En la siguiente figura, se muestran los elementos que componen el ojo.



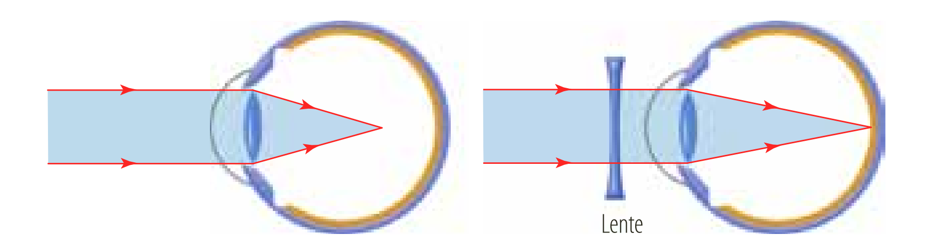
Los rayos luminosos provenientes del objeto atraviesan la córnea, donde sufren la primera refracción. Detrás de la córnea existe un líquido llamado humor acuoso en el cual los rayos luminosos experimentan una difracción. La cantidad de luz que ingresa al ojo es regulada por el iris que rodea la pupila y le da el color característico al ojo.

Las ondas luminosas atraviesan el cristalino, cuya estructura elástica y transparente actúa como una lente convergente. Los rayos de luz vuelven a refractarse al atravesar el humor vítreo, una sustancia gelatinosa que ocupa la parte interna del globo ocular, para llegar finalmente a la retina, la cual se comporta como una pantalla para los rayos luminosos. Allí se forma una imagen real, menor e invertida, de lo que se ve.

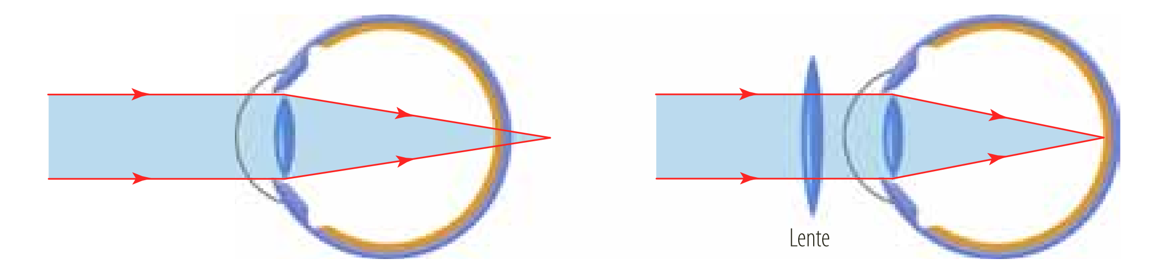
En la retina se encuentran las células receptoras de la luz que transforman los estímulos luminosos en impulsos nerviosos que al llegar al cerebro son interpretados, para dar lugar a las sensaciones de color, movimiento y forma del objeto completando así el proceso de visión.

Sin embargo, esta cámara tan perfecta en ocasiones suele presentar anomalías que impiden una visión normal. Muchos de los defectos se corrigen simplemente mediante el uso de lentes especialmente diseñados. Entre los defectos de la visión, se encuentran la miopía, la hipermetropía y el astigmatismo, cuyo origen se produce por alguna malformación del globo ocular.

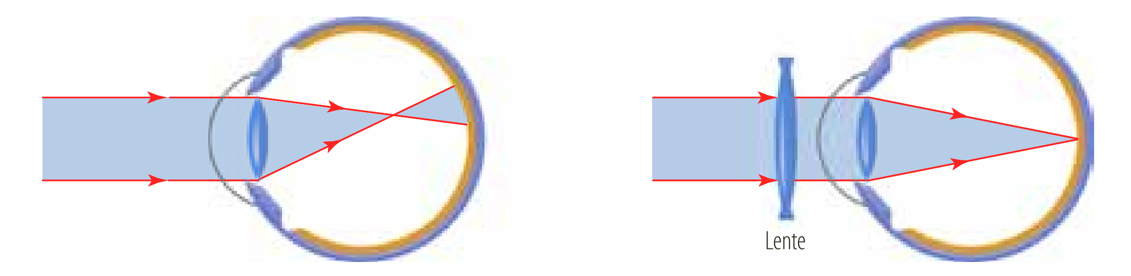
- *La miopía:* en un ojo miope el globo ocular es más largo de lo normal, por lo que la imagen se forma antes de llegar a la retina, para corregir este defecto se antepone una lente divergente como se observa en la siguiente figura.



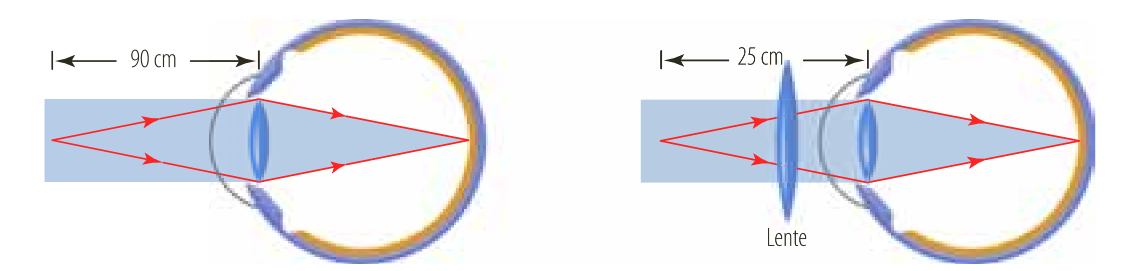
- *La hipermetropía:* en el ojo hipermétrope el globo ocular es más corto de lo normal, por tanto, la imagen se forma detrás de la retina. La corrección se logra anteponiendo una lente convergente.



- *El astigmatismo:* en un ojo con astigmatismo la curvatura de la córnea o del cristalino es irregular, lo cual produce una imagen borrosa que es corregida anteponiendo una lente cilíndrica.



Uno de los problemas visuales que suele aparecer entre los cuarenta y cincuenta años es la **presbicia** o **vista cansada**, la cual consiste en la pérdida de la capacidad de acomodación debida a la fatiga de los músculos filiares o a la pérdida de flexibilidad del cristalino, que se queda en su posición menos convergente.



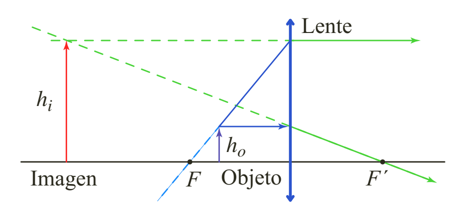
Como consecuencia de esta anomalía, el punto próximo se aleja; por tal razón, quienes la padecen alejan los objetos para poder verlos nítidamente. Para corregir este problema se antepone una lente convergente.

Aunque en la actualidad estas imperfecciones se pueden corregir por medio de la tecnología láser, existen defectos oculares que no pueden ser corregidos con el uso de lentes, como el daltonismo, las cataratas y el glaucoma. El **daltonismo** es una enfermedad hereditaria y las personas que la padecen no pueden ver todos los colores. La **catarata** es producida por la disminución de la transparencia del cristalino, lo que puede provocar la pérdida total de la visión. El **glaucoma** es una enfermedad hereditaria en la cual aumenta la presión intraocular debida a la obstrucción de los conductos de drenaje. Puede ocasionar la pérdida total e irreversible de la visión.

4.4 La lupa

Una lupa es una lente convergente (biconvexa), de pequeña distancia focal, que se interpone entre el ojo y el objeto que se desea observar para aumentar el tamaño de la imagen formada en la retina.

Puesto que la lupa es una lente convergente, al ser ubicado el objeto entre el foco y la lente, la imagen que se obtiene es mayor, derecha y virtual.



La percepción detallada de un objeto depende del tamaño de la imagen que se forma en la retina y esta depende del ángulo subtendido por el objeto en el ojo; así un objeto que sostienes en la mano a 60 cm de distancia se verá el doble a la mitad de la distancia.

Si llamamos N al punto más cercano que nuestro ojo puede ver un objeto y como la imagen es virtual, entonces $d_i = -N$, por tanto:

$$\frac{1}{d_0} = \frac{1}{f} - \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f} + \frac{1}{N}$$

$$d_0 = \frac{N \cdot f}{(f + N)}$$

La amplificación de la lupa es el cociente entre el tamaño angular visto con la lente y el tamaño angular visto cuando el objeto se observa en el punto cercano sin lente, el cual es igual a 25 cm, por tanto, el aumento está dado por la expresión:

$$M = 1 + \frac{N}{f}$$

es decir,
$$M = 1 + \frac{25\text{ cm}}{f}$$

EJEMPLO

¿Cuál es la máxima amplificación de una lente que tiene una distancia focal de 20 cm, y cuál es la amplificación de la misma lente con el ojo relajado?

Solución:

La amplificación máxima sucede cuando la imagen formada por la lente se encuentra en el punto cercano al ojo, es decir:

$$M = 1 + \frac{25\text{ cm}}{f}$$

$$M = 1 + \frac{25\text{ cm}}{20\text{ cm}} = 2,25\text{ cm}$$ *Al remplazar y calcular*

Cuando el ojo está relajado, la imagen se encuentra en el infinito, por tanto,

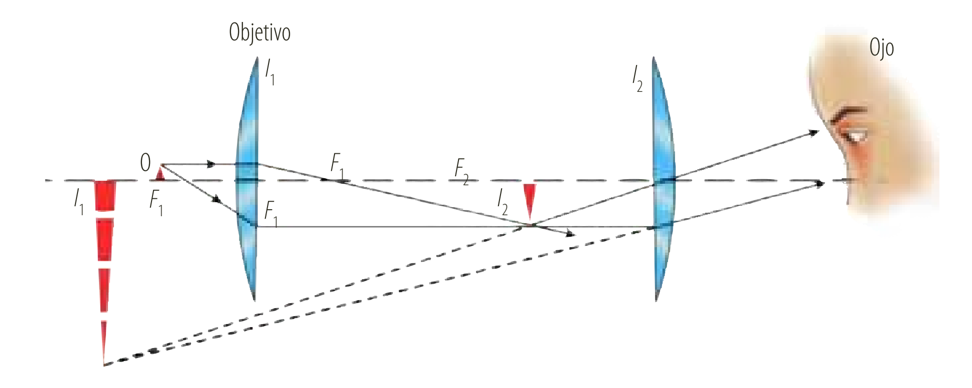
$$M = \frac{25\text{ cm}}{20\text{ cm}} = 1,25\text{ cm}$$

4.5 El microscopio

Un microscopio es un instrumento óptico que sirve para aumentar el ángulo bajo el cual se ve un objeto. Permite observar detalles de objetos que son muy pequeños, sin embargo, no se puede construir un microscopio que permita observar el átomo, ya que para poder observarlo, su tamaño debe ser del orden de la longitud de la luz. La capacidad de un microscopio óptico depende del tamaño relativo del objeto respecto a la longitud de onda de la luz utilizada para observarlo.

Se puede construir un microscopio con una lente convergente, denominado **microscopio simple**, pero la amplitud obtenida será igual a la de la lupa.

El **microscopio compuesto** consta de dos lentes convergentes denominadas objetivo y ocular. El objeto se coloca a una distancia superior al foco pero menor del doble de la distancia focal del objetivo, de tal forma que la imagen que genera el objetivo es real, invertida y de mayor tamaño que el objeto, como se observa en la siguiente figura.



Esta imagen se forma un poco más cerca de la distancia focal del ocular, el cual tiene una distancia mayor que el objetivo. Por tal razón, produce una imagen virtual y amplificada que ve el observador.

La amplificación que se obtiene con respecto al objeto es la multiplicación de los aumentos producidos por las dos lentes.

El aumento total, M_T, de la configuración está dado por la expresión:

$$M_T = \left(\frac{d_i}{d_o}\right)_{objetivo} \cdot \left(\frac{d_i}{d_o}\right)_{ocular}$$

Este aumento es mayor que la unidad cuando la distancia focal del ocular es menor que la distancia del punto próximo y mayor que la distancia focal del objetivo, para lo cual es muy conveniente que esta sea más pequeña que la del ocular.

La imagen del ocular está a una distancia de 25 cm, dado que es el punto más cercano que puede observar un ojo normal. Los microscopios modernos tienen un límite de amplificación de 2.000X aproximadamente, ya que están provistos de binoculares (un ocular para cada ojo).

Estos oculares son intercambiables y suelen tener tres objetivos en una torrecilla giratoria, además están equipados con un sistema condensador de luz y con un diafragma de iris debajo de la plataforma del microscopio, que enfocan y controlan la iluminación de la fuente externa o interna de luz.

El límite máximo de 2.000X se debe a que si el tamaño del objeto es del orden de la longitud de onda de la luz, por efectos de difracción la imagen se difumina. Para solucionar este problema los microscopistas iluminan con haces de electrones en lugar de luz, ya que los haces de electrones tienen longitudes de onda extremadamente cortas.

Los microscopios electrónicos no usan lentes para enfocar y aumentar las imágenes sino campos eléctricos y magnéticos. Estos microscopios tienen una amplificación de hasta 200.000X.

Para observar objetos opacos se iluminan mediante una fuente colocada sobre ellos. Si el objeto es transparente, tales como células o algún tejido, la luz proviene de una fuente situada por debajo del portaobjetos.

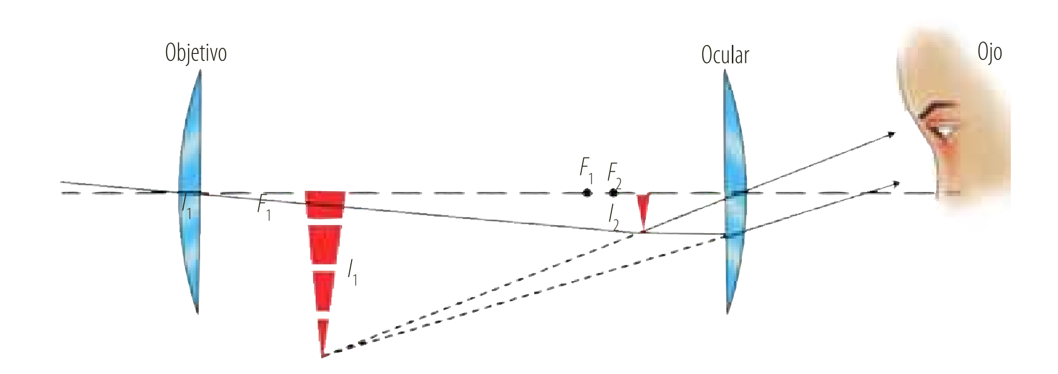
4.6 El telescopio

Un telescopio es un instrumento que permite la observación de objetos lejanos, al igual que el microscopio compuesto requiere más de una lente.

El telescopio ha sido uno de los instrumentos que han contribuido en mayor medida al conocimiento adquirido por el hombre sobre los cuerpos celestes, desde que Galileo Galilei lo utilizara con fines astronómicos.

Existen diversos tipos de telescopios, pero una primera clasificación de ellos es la de telescopios refractores y telescopios reflectores.

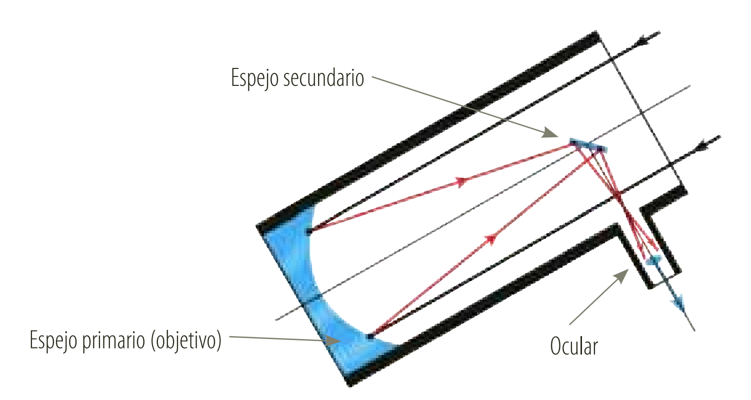
En un **telescopio astronómico de refracción**, se usan dos lentes convergentes, una como objetivo y otra como ocular. Los rayos paralelos provenientes de un objeto lejano forman una imagen real e invertida en el plano focal del objetivo. El cual a su vez, es el objeto del ocular ubicado un poco más cerca de su foco, de esta manera, amplía la imagen que el observador perciba y la presenta en forma virtual y amplificada, como se observa en la siguiente figura.



El aumento del telescopio está dado por su aumento angular y se expresa como:

$$M = \frac{f_{objetivo}}{f_{ocular}}$$

Para lograr un aumento mayor, la lente objetivo deberá tener una distancia focal muy grande y la lente ocular una distancia focal corta. Para obtener una imagen brillante de estrellas distantes la lente objetivo debe ser grande, pero pulir lentes grandes es un trabajo muy dispendioso, por eso los telescopios más grandes usan un espejo curvo como objetivo y se denominan **telescopios de reflexión**.



Para observaciones de imágenes terrestres, no resulta práctica la utilización de un telescopio de refracción, debido a que la imagen que produce es invertida. Para ello, se coloca una lente divergente como ocular, de tal forma, que los rayos se intercepten antes de llegar al foco del objetivo; el único inconveniente que presenta esta solución es que su campo visual es corto.

Otra solución es colocar una lente convergente entre el objetivo y el ocular que invierta la imagen, pero el tubo resulta ser muy largo. Lo más práctico es colocar en medio del objetivo y el ocular, prismas con reflexión total.

El telescopio más grande del mundo se encuentra ubicado en el Monte Pastukhov en el Cáucaso (Antigua Unión Soviética) tiene un diámetro de 6 m y es un telescopio reflector. El telescopio refractor más grande del mundo se ubica en un observatorio de Wisconsin, tiene un metro de diámetro.

EJEMPLOS

Se desea construir un microscopio de baja potencia con dos lentes para ver los circuitos impresos de una tarjeta. El objetivo tiene distancia focal de 20 mm y el ocular tiene distancia focal de 50 mm.

a. ¿Cómo deben ser las distancias entre las lentes?
b. ¿Cuál es el aumento total del microscopio?

Solución:

a. Para el ocular, la imagen debe estar a 25 cm, porque es la distancia más cercana para que un ojo normal vea nítidamente:

$$d_0 = \frac{N \cdot f}{(f + N)}$$

$$d_0 = \frac{25 \text{ cm} \cdot 5 \text{ cm}}{(5 \text{ cm} + 25 \text{ cm})} = 4{,}17 \text{ cm} \quad \textit{Al remplazar y calcular}$$

La imagen del objetivo debe estar a 4,17 cm del ocular.

Para que el objetivo dé una imagen real y aumentada, el objeto debe estar un poco más alejado de su foco, 2,2 cm

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{d_0} + \frac{1}{d_i}$$

$$\frac{1}{2 \text{ cm}} = \frac{1}{2{,}2 \text{ cm}} + \frac{1}{d_i} \quad \textit{Al remplazar}$$

$$d_i = 22 \text{ cm} \quad \textit{Al calcular}$$

Por lo tanto, el ocular y el objetivo deben distar 26,17 cm aproximadamente.

b. El aumento está dado por:

$$M_T = \left(\frac{d_i}{d_o}\right)_{objetivo} \cdot \left(\frac{d_i}{d_o}\right)_{ocular}$$

$$M_T = \left(\frac{22 \text{ cm}}{2{,}2 \text{ cm}}\right)_{objetivo} \cdot \left(\frac{25 \text{ cm}}{4{,}17 \text{ cm}}\right)_{ocular}$$

$$MT = 59{,}95 \quad \textit{Al calcular}$$

El aumento del microcopio es, aproximadamente 60 *X*.





Interpreta

1 **Relaciona cada teoría sobre la luz con su autor.**

a. Existe un medio llamado éter por donde se propaga la luz como una onda.

b. La luz está compuesta por pequeñas partículas denominadas corpúsculos.

c. La luz proviene del Sol, siendo los ojos receptores y no emisores.

d. Demostró de forma teórica la naturaleza ondulatoria de la luz.

e. La luz es un pequeño espectro de ondas electromagnéticas.

f. Comprobó la naturaleza ondulatoria de la luz haciendo experimentos sobre interferencia y difracción.

- [ ] Alhasén.
- [ ] Christian Huygens.
- [ ] Thomas Young.
- [ ] James Maxwell.
- [ ] Jean Fresnel.

2 **Marca con una ✗ las casillas que representen la imagen de un objeto que se ubica entre el centro de curvatura y el foco para cada uno de los espejos.**

Espejo	Real	Virtual	Derecha	Invertida
Cóncavo				
Convexo				

Marca con una ✗ la respuesta correcta.

3 **El método para medir la velocidad de la luz en donde se determinó el período de una de las lunas de Júpiter, Io, mediante la medición del tiempo que esta luna emplea en completar dos eclipces sucesivos fue realizado por:**

a. Louis Fizeau.
b. Albert Michelson.
c. Galileo Galilei.
d. Olaus Roemer.

4 **El fenómeno ondulatorio que se produce por cristales que permiten que la luz pase en determinadas direcciones y en otras simplemente sea absorbida, es:**

a. Interferencia.
b. Polarización.
c. Difracción.
d. Reflexión.

Argumenta

5 **Cuando miramos un objeto, ¿la luz sale de los ojos o entra en ellos? ¿Qué diferencia hay entre un objeto luminoso y un objeto iluminado? ¿Ambos emiten luz?**

6 **Lee la siguiente información y luego responde:**

Las primeras fotografías, llamadas heliografías, fueron hechas por el francés Niépce. Unos años después el pintor francés Jacques Daguerre realizó fotografías en planchas cubiertas con una capa sensible a la luz de yoduro de plata. Más adelante se popularizó la práctica como profesión y afición y en el siglo XX, se popularizó aún más gracias a la realización de imágenes digitales sin necesidad de película y que envían directamente la fotografía a sistemas de almacenamiento como las computadoras.

- ¿Qué parte de la óptica está relacionada con la fotografía?
- ¿Por qué se dice que la fotografía es un excelente instrumento de documentación?

7 **Hoy la mayoría de las personas cuentan con una máquina fotográfica digital. Realiza un cuadro comparativo entre una máquina fotográfica de película y una cámara digital. Señala sus ventajas y desventajas.**

Propone

Nuestros ojos, primero, realizan la formación de una imagen inversa y después, en fracciones de segundo, la convierte en una imagen real a través de un proceso biológico.

8 **En los últimos años se observa que mayor cantidad de jóvenes sufren de enfermedades visuales que son producidas en algunas ocasiones por herencia y, en otros casos, por no tener cuidados básicos con los ojos. ¿Qué recomendarías a tus compañeros de curso para prevenir enfermedades visuales?**

9 **Responde. ¿Cómo se relacionan la física y la biología en el estudio del ojo humano?**

10 **Responde. ¿Crees que la física ayuda en la solución de problemas médicos? Explica tu respuesta.**

11 **Realiza un mapa conceptual donde expliques los fenómenos ondulatorios que se dan en la luz.**

Actividades

Verifica conceptos

1 Escribe V, si la afirmación es verdadera o F, si es falsa. Justifica tu respuesta.

- ☐ Albert Einstein planteaba que la velocidad de la luz es la máxima que puede existir en el universo y es 3×10^8 m/s.
- ☐ En el modelo electromagnético la luz se comporta como una corriente de partículas en forma rectilínea a gran velocidad.
- ☐ Louis Fizeau utilizó una rueda dentada que giraba y por allí cruzaba un haz de luz, el cual recorría diferentes caminos y regresaba al observador para calcular la velocidad de la luz.
- ☐ La longitud de onda para la luz según el espectro electromagnético es del orden de 10^{-11} m.
- ☐ En el experimento de la doble rendija el patrón de interferencia se observa mediante franjas oscuras y claras.
- ☐ La distancia entre dos líneas consecutivas de interferencia constructiva depende de la longitud de onda de la luz utilizada.
- ☐ El flujo luminoso a una determinada distancia de la fuente se distribuye en la superficie de una esfera con centro en un punto diferente a la fuente luminosa.
- ☐ Una onda de color rojo tiene una longitud de onda de 690 nm.

2 Completa los siguientes enunciados.

a. La difracción de la ______________ se observa mejor cuando las ondas luminosas se encuentran en ______________.

b. La interferencia ______________ se da cuando la diferencia de caminos entre dos ondas es λ, 2λ o en general cuando la diferencia de caminos es un número ______________ de longitudes de onda.

c. La ______________ es el estudio de la capacidad que tiene la radiación ______________ de estimular la visión.

d. El filtro polaroid fue diseñado por ________ ________ y consiste en ordenar una serie de moléculas para permitir el paso de la luz en una sola ________.

3 Responde. ¿Qué características de la luz pone de manifiesto el efecto fotoeléctrico?

a. Su carácter corpuscular.

b. Su carácter ondulatorio.

c. Su carácter electromagnético.

d. Su dualidad onda-partícula.

4 Explica los tres modelos de la naturaleza de la luz.

5 Responde. ¿Cómo podemos medir velocidades extremadamente grandes como la de la luz?

Analiza y resuelve

6 Responde. ¿Qué características tiene la luz monocromática en lo que se refiere a la longitud de onda? ¿Qué fuentes de luz monocromática conoces?

7 Responde. ¿Cómo se puede obtener luz monocromática a partir de una fuente de luz blanca?

8 Responde. ¿A qué se llama interferencia constructiva? ¿Qué es la interferencia destructiva? ¿En qué fenómenos cotidianos se puede observar la interferencia de ondas luminosas?

9 Explica si las franjas de interferencia se obtendrán con rendijas extremadamente anchas. ¿Qué relación tiene la longitud de onda con este hecho?

10 Responde. ¿Por qué una superficie puede resultar brillante para algunas ondas y opaca para otras?

11 Se tiene tres filtros polarizadores iguales. Se hace incidir luz no polarizada linealmente. Si se intercepta esta luz con un segundo filtro cuyo eje de polarización está en dirección perpendicular al primero, ¿qué se observa a la salida de ambos?

12 El Sol irradia ondas electromagnéticas correspondientes a toda una gama de frecuencias visibles e invisibles. Un porcentaje de esta radiación es absorbida en las capas superiores de la atmósfera. ¿De qué tipo crees que será la mayor parte de la radiación electromagnética que llega hasta la superficie de la Tierra?

Actividades

Problemas básicos

13 **Calcula la longitud de onda de una radiación electromagnética cuya frecuencia es 100 MHz.**

14 **La distancia entre los cuerpos celestes muy lejanos se expresa en años luz (distancia que recorre la luz en un año). Si la luz de una estrella emplea 10 años en llegar hasta la Tierra:**

a. ¿Qué distancia recorre la luz emitida por la estrella en ese tiempo?

b. ¿Podríamos afirmar que la estrella sigue existiendo si la observamos desde la Tierra?

15 **Responde. ¿Cuánto tiempo, en segundos, tarda la luz del Sol en llegar a la Tierra, si la distancia promedio entre ellos es de 150 millones de kilómetros?**

16 **La estrella α-Centauro se encuentra a 4,3 años luz del sistema solar.**

a. Expresa la distancia en unidades del Sistema Internacional.

b. Si una nave espacial realizara el viaje a diez veces la velocidad del sonido, ¿cuánto tardaría en recorrer la misma distancia?

17 **Una estrella se encuentra a 500 años luz de la Tierra.**

a. ¿Cuánto tiempo se demora la luz en llegar a la Tierra?

b. ¿Cuál es la distancia, en kilómetros, hasta la Tierra?

18 **La luz que proviene de una estrella recorre 4,6 años luz para llegar a la Tierra. ¿A qué distancia se encuentra la estrella de la Tierra?**

19 **Los astrónomos descubren la existencia de un sistema solar, semejante al de nosotros, en torno a la estrella Vega, situada a 26 años luz de la Tierra. ¿Cuál es la distancia, en metros, que hay de la estrella Vega hasta la Tierra?**

20 **Un rayo de luz tiene una longitud de onda que mide $6{,}5 \times 10^{-5}$ m. Calcula la frecuencia y el período en:**

a. el aire. b. el agua.

21 **Una emisora emite a 93 MHz. Halla:**

a. La velocidad de propagación.

b. Su frecuencia en Hz.

c. Su período.

22 **La distancia entre la Tierra y la Luna es de 384.000 km. Responde:**

a. ¿Cuánto tiempo tardaría en llegar una nave que viaja a 1.000 km/h?

b. ¿Qué tiempo emplea la luz en el mismo viaje?

23 **Dos fuentes coherentes de rendija doble (rendijas de Young) se encuentran separadas entre sí 0,04 mm y distan de una pantalla 1 m. Si la franja brillante de segundo orden ($n = 2$) se encuentra separada del máximo central 3 cm y la luz que se emplea es monocromática, determina la longitud de onda de la luz empleada.**

24 **Una pantalla se encuentra a 150 cm de una fuente de luz que pasa por dos rendijas. La distancia desde la franja central hasta la tercera franja de interferencia es 7 cm y la separación entre las rendijas es de 1,5 mm. Determina:**

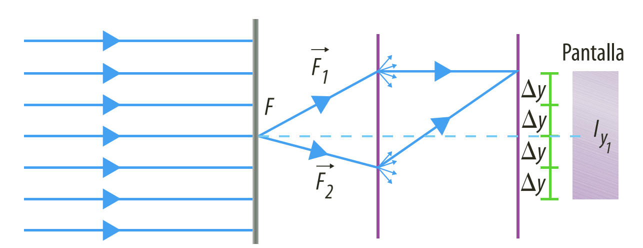
a. La longitud de onda de la luz.

b. La separación entre las franjas brillantes.



Problemas de profundización

25 **Iluminamos una rendija muy delgada con luz monocromática de 700 nm, transformándose por difracción en un foco emisor de luz en todas las direcciones. Los rayos emitidos iluminan dos pequeñas rendijas que están separadas 0,1 mm y que funcionarán como focos coherentes productores de interferencias en una pantalla que se encuentra a 40 cm de ellas.**



Determina:

a. Distancia entre dos máximos consecutivos.

b. La posición del primer mínimo, contado a partir del centro de la pantalla.

c. La posición del décimo máximo.

26 **Se realiza el experimento de Young usando una luz monocromática, donde: $a = 0{,}02$ cm; $d = 130$ cm; midiendo la separación entre dos franjas brillantes, se tiene $\Delta y = 0{,}35$ cm. ¿Qué color de luz se usó?**



Verifica conceptos

1 **Escribe V, si la afirmación es verdadera o F, si es falsa. Justifica tu respuesta.**

- ☐ Un rayo de luz es una línea imaginaria que se traza en dirección perpendicular a la onda.
- ☐ Una onda reflejada es aquella que viaja por el mismo medio de la onda incidente después de alcanzar la frontera entre dos medios.
- ☐ La normal es una recta perpendicular a la línea que divide los dos medios.
- ☐ En los espejos planos el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión.
- ☐ En los espejos convexos la luz incide por la parte interna de la superficie esférica.
- ☐ El foco está a una distancia equivalente al doble del radio de curvatura de un espejo esférico.
- ☐ En un espejo esférico una imagen derecha es aquella que está por encima del eje óptico.

2 **Nombra diferencias entre los conceptos mencionados.**

a. Ángulo de incidencia y ángulo de reflexión.
b. Un haz de luz y un rayo de luz.
c. Espejos planos y espejos esféricos.
d. Espejo cóncavo y espejo convexo.
e. Radio de curvatura y centro de curvatura.
f. Imagen real e imagen virtual.

3 **Completa la siguiente tabla de acuerdo con la condición dada.**

En la ecuación	Positiva (+)	Negativa (−)
d_0		
d_i		
d_f		
R		

Marca con una ✗ la respuesta correcta en las preguntas 4, 5 y 6.

4 **Una imagen virtual es aquella que:**

- ☐ Se forma invertida en el espejo.
- ☐ Se forma por fuera del espejo.
- ☐ Se forma en el interior del espejo.
- ☐ Es opaca.

5 **En la reflexión de la luz:**

- ☐ El ángulo de incidencia es mayor que el ángulo de reflexión.
- ☐ El ángulo de reflexión es mayor que el ángulo de incidencia.
- ☐ El ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión.
- ☐ Los ángulos son despreciables.

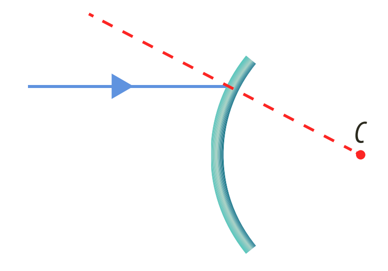
6 **En los espejos se cumple que:**

- ☐ La distancia focal siempre es negativa.
- ☐ Las imágenes reales están delante del espejo.
- ☐ La distancia del objeto siempre es positiva.
- ☐ Las imágenes generadas pueden ser reales o virtuales.

Analiza y resuelve

7 **Responde. ¿La imagen producida por un espejo plano siempre es virtual? Explica tu respuesta.**

8 **Traza la trayectoria del rayo reflejado en la superficie especular circular que se muestra en la figura.**



9 **Responde. ¿Los espejos convexos siempre generan imágenes reales para cualquier posición del objeto?**

10 **En los parqueaderos para revisar los vehículos en la parte inferior usan espejos convexos. ¿Por qué crees son útiles estos espejos para este trabajo?**

11 **Responde. ¿Cuál es el número de imágenes completas que se generan con dos espejos planos que son perpendiculares entre sí?**

12 **Si te colocas frente a un espejo plano, tu lado izquierdo se refleja al lado derecho de tu imagen. ¿Es correcto afirmar que el espejo plano invierte la imagen?**



Actividades

13 **Cuando observas a través de un vidrio de una ventana hacia el exterior durante la noche, a veces vemos una imagen doble de nosotros mismos.**

a. ¿Qué fenómeno de la luz ocurre?

b. ¿Cuántos medios interactúan?

c. ¿El vidrio presenta doble interfaz de medios?

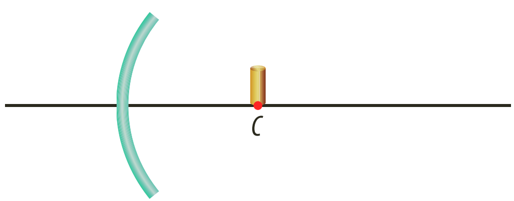
d. ¿Cada interfaz genera una imagen?

14 **En la superficie de una carretera que uno observa al conducir en la noche, cuando el pavimento está seco, la luz de los vehículos que se aproximan se dispersa en diferentes direcciones y el pavimento es muy visible. ¿Qué tipo de reflexión se da cuando la carretera está seca?**

15 **En una noche lluviosa, cuando el camino está mojado, las irregularidades de la carretera se llenan de agua. En este caso, la luz experimenta reflexión especular. Explica en qué consiste este fenómeno.**

16 **Si la imagen producida por un espejo esférico es real, ¿necesariamente es invertida con respecto al objeto?**

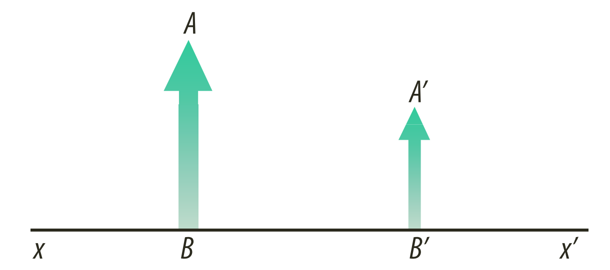
17 **Un objeto se ubica en el centro de curvatura como se muestra en la figura. Traza el diagrama que permita localizar correctamente la imagen del espejo.**



18 **En la figura se muestra un objeto real de longitud *AB* y su imagen asociada de longitud *A'B'* formada por un espejo esférico cuyo eje de simetría es *xx'*.**

a. Construye el espejo y realiza el diagrama para encontrar la imagen.

b. Di las características de la imagen.



Problemas básicos

19 **Un haz de luz incide sobre un espejo plano. Dibuja las direcciones del rayo incidente y del reflejado cuando el ángulo de incidencia es:**

a. 30° b. 45° c. 90°

20 **Considera que la distancia focal a un espejo cóncavo es de 4 cm. Determina gráficamente y por medio de ecuaciones la posición y el tamaño de la imagen de un objeto de 1 cm de altura, producida si se coloca:**

a. A 8 cm del espejo.

b. A 4 cm del espejo.

c. A 10 cm del espejo.

d. En el centro de curvatura.

e. En el foco.

En cada caso establece si la imagen es real o virtual, derecha o invertida, de mayor o menor tamaño que el objeto.

21 **Si se coloca un objeto a 5 cm del vértice de un espejo cóncavo y se sabe que el radio de curvatura del espejo es de 24 cm, determina:**

a. ¿A qué distancia del espejo se forma la imagen?

b. ¿Qué tipo de imagen se forma?

22 **Responde. ¿A qué distancia de un objeto convexo con una distancia focal de 30 cm, se debe colocar un objeto para obtener una imagen de 4 cm, si el tamaño del objeto es de 8 cm?**

23 **Se obtiene una imagen mediante un espejo esférico cóncavo que está a 8 cm del espejo y el objeto se encuentra a 24 cm del mismo. Halla el radio de curvatura del espejo.**

24 **A 10 cm del vértice de un espejo esférico convexo se coloca un objeto. Si la distancia focal es de 18 cm, indica a qué distancia se forma la imagen.**

25 **El radio de curvatura de un espejo esférico cóncavo es de 50 cm, si se coloca un objeto a 30 cm del espejo, ¿cuál es la distancia objeto-imagen?**

26 **Responde. ¿Cuál es el radio de curvatura de un espejo cóncavo si un objeto situado a 12 cm forma su imagen a 18 cm?**

27 **Utilizando un espejo esférico se desea obtener una imagen *i* de un determinado objeto *O*. Si se sabe que la imagen debe ser derecha, reducida a 1/5 de la altura del objeto y su foco debe estar a 12 cm del espejo, ¿qué tipo de espejo esférico se debe usar? ¿Cuál será su radio de curvatura?**

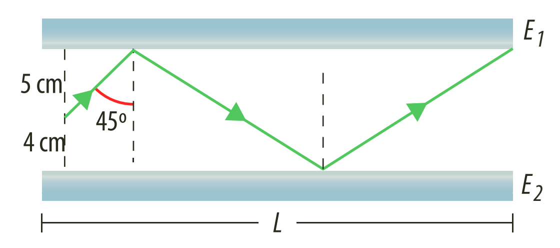
28 **Una persona ubicada a 40 cm de un espejo se ve tres veces mayor y con una imagen directa. ¿Cuál es su distancia focal?**

29 **Un objeto es colocado a 40 cm del vértice de un espejo esférico cóncavo, de radio de curvatura 30 cm. ¿Cuál es la distancia a la cual se forma la imagen desde el espejo?**

30 **Un objeto está colocado a 15 cm de un espejo convexo de 5 cm de radio de curvatura. Encuentra la distancia de la imagen al vértice.**

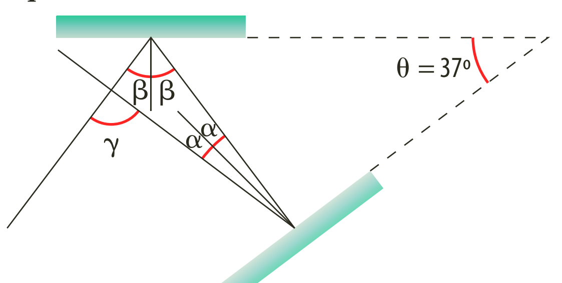
Problemas de profundización

31 **En la figura se muestran dos espejos E_1 y E_2 de longitud *L*, que están dispuestos de tal forma que son paralelos entre sí y dirigidos uno hacia el otro.**



Una fuente luminosa *F* lanza un rayo de luz que es reflejado en E_1, E_2 y finalmente, en la extremidad de E_1. ¿Cuál es la longitud L de los espejos en centímetros?

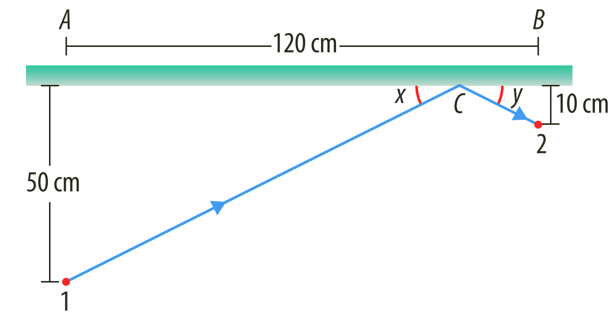
32 **Considera un rayo de luz contenido entre dos espejos planos conforme se muestra en la figura. El rayo reflejado forma un ángulo γ con el rayo incidente, cuyo valor es diferente al ángulo α. Calcula el valor de γ, en grados, considerando que θ = 37°.**



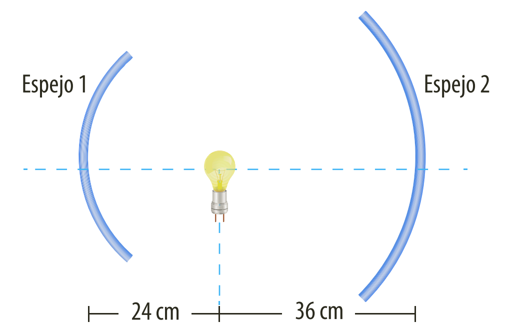
33 **Un rayo de luz parte de un punto 1 e incide sobre un espejo plano en el punto *C* y luego, se refleja hacia el punto 2 como se muestra en la figura.**

a. Determina la razón *x*/*y*.

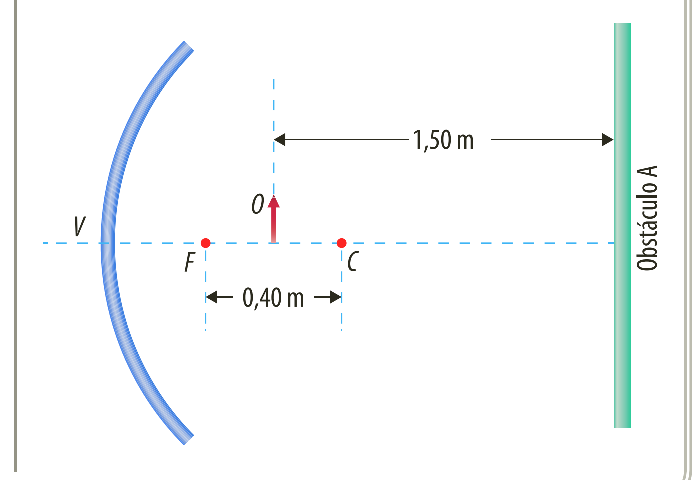
b. Determina la distancia entre el punto *A* y el punto *C*.



34 **Dos espejos cóncavos son colocados uno en frente del otro, con sus focos localizados sobre la misma línea recta. Considerando los rayos luminosos que se muestran en la figura, halla las distancias focales de los espejos 1 y 2.**



35 **La figura representa un espejo esférico de vértice *V*, foco *F* y centro de curvatura *C*. Un objeto *O*, de 5 cm de altura es colocado entre el foco y el centro de curvatura. ¿Cuál es la altura de la imagen si se observa en el obstáculo *A*?**



Actividades

Verifica conceptos

1 **Escribe V, si la afirmación es verdadera o F, si es falsa. Justifica tu respuesta.**

- ☐ Cada rayo incidente y refractado forma un plano que contiene la recta normal a la superficie de separación.
- ☐ El rayo refractado es aquel que llega a la frontera de los dos medios.
- ☐ La normal es la recta paralela que divide los dos medios.
- ☐ Los ángulos de incidencia y refracción se relacionan con las velocidades de la onda en los dos medios de propagación.
- ☐ La refracción total ocurre cuando el ángulo del rayo incidente con respecto a la normal es 0°.
- ☐ El índice de refracción es la razón entre la rapidez de la luz en el vacío y la rapidez de la luz en otro medio.
- ☐ La aberración cromática consiste en la descomposición de la luz blanca en todos los colores del espectro luminoso.

Lee y marca con una ✗ la respuesta correcta en 2 y 3.

2 **Con relación al índice de refracción de una sustancia podemos decir:**

- ☐ Su valor es siempre mayor que 1.
- ☐ Su valor siempre es menor que 1.
- ☐ El índice de refracción se expresa $n = v/c$.
- ☐ n del diamante es 1.

3 **No es un elemento de la refracción.**

- ☐ La normal.
- ☐ Rayo refractado.
- ☐ Rayo reflejado.
- ☐ Ángulo de refracción.

4 **Completa cada uno de los siguientes enunciados.**

a. Cuando un rayo de luz que viaja sobre un medio y llega a otro medio se ______________ cambiando la dirección del rayo en el nuevo ______________ de propagación.

b. El ángulo de ______________ es el ángulo formado por la ______________ y el rayo refractado.

c. En la ______________ de la luz blanca, los rayos luminosos inciden sobre un prisma ______________ en colores desde el rojo hasta el violeta.

d. La reflexión total se da cuando el ángulo de ______________ para el cual la luz es refractada se propaga en dirección ______________ a la superficie de separación de los ______________.

5 **Responde. ¿Cuál es la diferencia entre el rayo incidente y el rayo refractado?**

Analiza y resuelve

6 **El arco iris corresponde a un ejemplo de refracción de la luz. Explica por qué.**

7 **Responde. ¿Por qué los diamantes tienen un brillo especial?**

8 **Explica por qué en las pompas de jabón o grasa, en algunas posiciones, se observa el espectro luminoso.**

9 **Al fijar con cinta adhesiva una moneda en el fondo de un vaso opaco, se observa que la moneda desaparece a medida que se aleja del recipiente.**

a. Si se vierte más agua en el vaso, ¿se puede observar nuevamente la moneda? ¿A qué fenómeno se debe esto? Explica tu respuesta.

b. ¿Qué sucede con los rayos de luz en esta situación?

10 **Responde. ¿Por qué al colocar un lápiz en un vaso con agua parece estar doblado o quebrado?**

11 **Se dice que el color de un objeto depende de la longitud de onda. Al mirar objetos coloridos bajo el agua, la longitud de onda de la luz es diferente.**

a. ¿El color depende realmente de la longitud de onda o de la frecuencia de la luz?

b. ¿El ojo tiene un fluido ocular y una longitud de onda determinada?

c. ¿Cuál es la longitud de onda que interesa para ver los colores: la de la luz o la del agua? Explica tu respuesta.



Problemas básicos

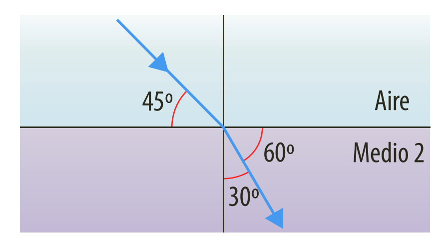
12 **Determina el ángulo límite para el paso de luz del prisma de vidrio (n = 1,5) al aire y dibuja la trayectoria seguida por el rayo.**

13 **Considera rayos de luz que se propagan en el agua (n = 1,33) y que se dirigen hacia el aire. Determina el ángulo de refracción para ángulos de incidencia de 20°, 40° y 45°.**

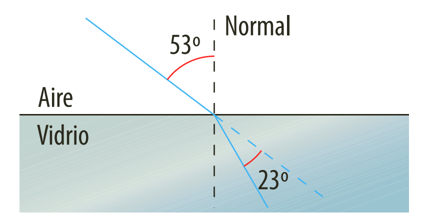
14 **Una luz con λ = 589 nm en el vacío atraviesa un objeto de sílice cuyo índice de refracción es n = 1,458. ¿Cuál es la λ de la luz en sílice?**

15 **Un rayo de luz pasa del aire a un medio con índice de refracción de 1,4. Si el ángulo de incidencia es 40°, determina el ángulo de refracción.**

16 **En la figura calcula el índice de refracción del medio 2.**



17 **Un haz de luz incide sobre una superficie de una placa de vidrio formando con la normal un ángulo de 53°. Si al refractarse se desvía 23° de la dirección original, calcula el índice de refracción del vidrio.**



18 **La velocidad de la luz en un vidrio es 75% de la que tiene en el vacío. Halla el índice de refracción del vidrio.**

19 **El diamante tiene un índice de refracción n = 2,5. ¿Cuál es la velocidad de la luz en el diamante?**

20 **Un rayo de luz que se propaga por el aire llega hasta otro medio con un ángulo de incidencia de 50°.**

a. Realiza el diagrama que represente la situación.

b. Calcula el índice de refracción del otro medio.

21 **Un rayo de luz láser pasa desde el aire hasta el agua.**

a. Dibuja la dirección del rayo de luz.

b. Si el ángulo de incidencia es de 45°, ¿cuál será el ángulo de refracción?

c. Si el ángulo de refracción es de 90°, ¿cuánto vale el ángulo de incidencia?



Problemas de profundización

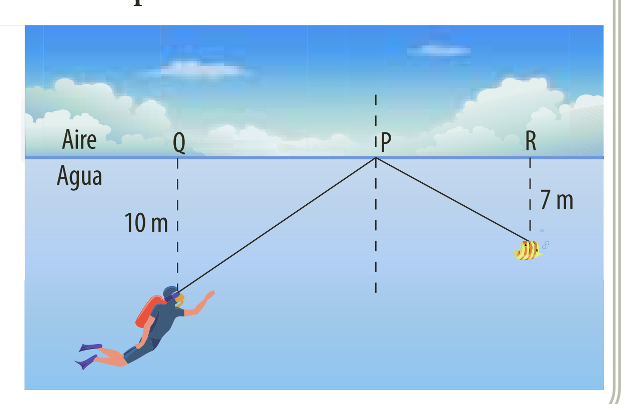
22 **Un rayo de luz pasa por un prisma, como se observa en la figura. ¿Cuál debe ser el índice de refracción del prisma?**

23 **Un rayo que viaja por el agua incide sobre una lámina de vidrio con un ángulo de 45°. ¿Cuál es el ángulo de refracción al entrar en el cristal?**

24 **Un rayo de luz incide con un ángulo de 35° en una de las caras de un prisma, cuyo ángulo refringente (ángulo de la cuña) es 40°. Calcula el valor del ángulo emergente si el índice de refracción del prisma es 1,4.**

25 **Se tienen dos líquidos de densidades diferentes, uno flota encima del otro. El líquido más denso, es decir, el que se encuentra en la sección inferior, posee un índice de refracción igual a 1,5, mientras que en el otro este valor es igual a 1. ¿Con qué ángulo se refracta un rayo de luz al penetrar en el líquido inferior, si entra perpendicular a la superficie superior?**

26 **Un buzo ve pasar un pez que se aleja de él. Al cabo de unos segundos y estando el buzo a 10 m de profundidad, mira hacia la superficie y, de pronto, ve aparecer la imagen del mismo pez que parece estar volando fuera del agua. Determina la distancia horizontal que los separa a ambos si se sabe que en ese momento el pez se encuentra a 7 m de profundidad.**



Actividades

Verifica conceptos

1 **Escribe V, si la afirmación es verdadera o F, si es falsa. Justifica tu respuesta.**

- [ ] Una lente convergente es aquella que permite que los rayos de luz se dirijan a un solo punto.
- [ ] Una lente biconvexa está formada por dos lentes convexas.
- [ ] En una lente el centro óptico es el punto ubicado en medio de los dos focos.
- [ ] En una cámara fotográfica el diafragma tiene la función de congelar el movimiento en un instante.
- [ ] La miopía se debe a que el globo ocular es más grande de lo normal y la imagen se forma pasando la retina.
- [ ] La lupa está hecha con una lente divergente de pequeña distancia focal.
- [ ] El telescopio de refracción astronómico se construye con dos lentes convergentes separadas entre sí una determinada distancia.
- [ ] El aumento permite conocer el grado hasta donde un sistema óptico cambia el tamaño de un objeto.

2 **Establece relaciones o diferencias entre los siguientes conceptos:**

a. Lente convergente y lente divergente.

b. Los focos y la distancia focal.

c. Plano focal objeto y plano focal imagen.

d. El obturador y el enfoque.

e. La hipermetropía y el astigmatismo.

3 **Responde. ¿Qué significan las dioptrías de una lente?**

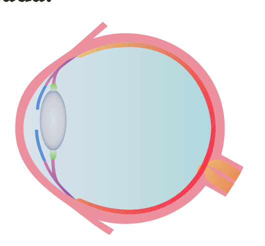
4 **Responde. ¿La imagen producida en un telescopio es real o virtual? Explica tu respuesta.**

5 **Explica cómo se construyen imágenes con lentes convergentes.**

6 **Responde. ¿Cuáles son los tipos de lentes convergentes que hay? Explica las características de cada uno.**

7 **Explica cómo funciona el ojo humano y por qué se puede considerar como un instrumento óptico.**

8 **Dibuja en la siguiente imagen cómo ingresan los rayos luminosos en el ojo cuando hay presbicia o vista cansada.**



Analiza y resuelve

9 **Responde. ¿En qué fenómeno se basa el funcionamiento de una lente?**

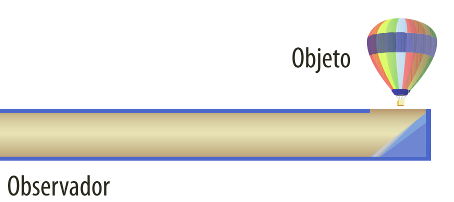
10 **Las lentes bicóncavas, ¿generan imágenes reales o virtuales? Explica tu respuesta.**

11 **Responde. ¿Con cuántos rayos se puede formar una imagen de un objeto en una lente?**

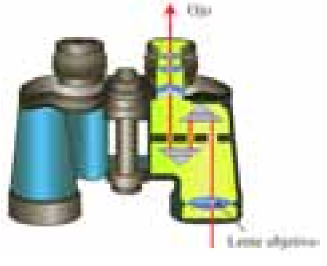
12 **Explica cuáles son las causas físicas de que una lente divergente siempre genere imágenes virtuales.**

13 **Un objeto se coloca a 10 cm de una lente biconvexa de 15 cm de distancia focal. ¿Qué características tendrá la imagen producida?**

14 **El diagrama muestra la forma de construir un periscopio, elemento usado en los submarinos, con dos espejos planos. Dibuja la trayectoria de los rayos que provienen de la imagen observada y las imágenes que se producen en cada espejo.**



15 **En los binoculares se deben utilizar prismas rectangulares para poder dirigir la luz hacia nuestros ojos ya que estos no están separados como el lente objetivo. ¿Cómo podemos explicar que la luz cambie de dirección, si en realidad los prismas no son espejos?**





Problemas básicos

16 Considera una lente divergente de distancia focal 25 cm. Determina la gráfica y analíticamente la posición de la imagen si se coloca un objeto de 1 cm de altura.

17 Un odontólogo mira la imagen virtual de un diente de 4 mm a 15 cm del espejo cóncavo utilizado. Si el radio de curvatura es de 5 cm, ¿a qué distancia, en centímetros, se debe ubicar el diente del espejo?

18 Una lente tiene radios $r_1 = 0{,}15$ m y $r_2 = 0{,}25$ cm. Si se ubica un objeto a metro y medio de ella, da una imagen real a 0,6 m. Encuentra el índice de refracción de la lente.

19 Frente a una lente convergente delgada se coloca un objeto a una distancia de 50 cm. La imagen de este objeto aparece del otro lado a 60 cm de la lente. ¿Cuál es la distancia focal de la lente?

20 Responde. ¿A qué distancia de una lente convergente se debe colocar un objeto para obtener una imagen virtual cinco veces más grande y situada a 30 cm de la lente?

21 Una lente convergente produce una imagen de un objeto sobre una pantalla colocada a 12 cm de esa lente. Cuando la lente se aleja 2 cm del objeto, la pantalla debe acercarse 2 cm hacia la lente para establecer el enfoque. Encuentra la distancia focal de la lente.

22 Responde. ¿Cuál es la distancia focal de una lente que tiene una potencia de 6 dioptrías?

23 Una película en una lente tiene un espesor de 4×10^{-7} m y se ilumina con luz blanca. El índice de refracción de la película es 1,2. ¿Para qué longitud de onda la lente no es reflejante? Explica tu respuesta.

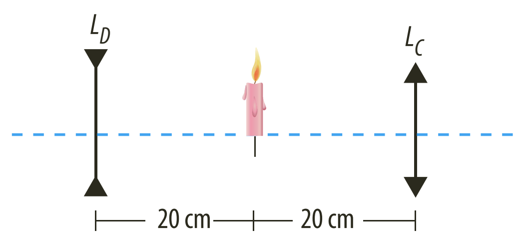
24 Calcula el diámetro de la imagen de la Luna formada en un espejo cóncavo de un telescopio de 2,5 m de distancia focal (el diámetro de la Luna es de 3.450 km aproximadamente, y su distancia a la Tierra es de 384.000 km).

25 Un objeto de 15 cm de altura se halla a 30 cm de una lente delgada y en posición vertical al eje de la lente. Si la imagen formada es invertida y de 5 cm de altura, calcula la distancia focal de la lente.



Problemas de profundización

26 Una vela está entre dos lentes delgadas, una divergente L_D y otra convergente L_C, a 20 cm de cada una como se muestra en la figura. Las lentes tienen distancias focales iguales de 10 cm. Con estas condiciones, halla la distancia que hay entre las imágenes producidas.



27 Dos lentes biconvexas de radios de curvatura iguales se encuentran en el aire con índices de refracción 1,5 y 1,7, respectivamente. Halla la relación que existe entre sus distancias focales.

28 Halla la distancia focal del sistema compuesto por dos lentes convergentes delgadas, colocadas una seguida de la otra, de distancias focales de 5 cm y 15 cm, respectivamente.

29 Una lupa produce una imagen a 30 cm de la lente. Para proporcionar un aumento de 16 veces, ¿cuál debe ser su distancia focal?

30 Considera una cámara fotográfica, equipada con una lente de distancia focal de 50 mm. Si la imagen está en el foco y el objeto está situado a 1 m de la lente, ¿cuál debe ser la distancia entre el centro óptico y la película?

31 En el ojo humano, la distancia entre la córnea y la retina es aproximadamente de 25 mm. Para focalizar al infinito un punto a 250 mm del ojo del observador, ¿cuál es la modificación que debe tener la distancia focal?

32 Una persona miope no puede ver con claridad objetos colocados a distancias mayores a 40 cm de sus ojos. ¿Cuál es el valor de la potencia de la lente correctora?

33 Se ha convenido que la visión normal de una persona tiene una distancia máxima de visión infinitamente grande y la distancia mínima es igual a 25 cm. Si una persona que tiene lentes de corrección consigue ver nítidamente objetos colocados a 40 cm de sus ojos, ¿cuál debe ser la convergencia de la lente correctiva, en dioptrías, para tener una visión normal?

Propagación de la luz

Uno de los fenómenos que cumple las ondas de la luz es **la reflexión**. Este fenómeno se puede estudiar considerando la luz como un flujo de partículas o como ondas. Este fenómeno ocurre cuando la luz que incide sobre una superficie lisa se refleja y cambia de dirección, por lo cual regresa al medio de origen. La reflexión es un fenómeno conocido por todos desde la infancia. Siempre vemos la imagen que produce de nosotros el espejo y el reflejo sobre una superficie de agua.

El propósito de esta práctica es determinar la posición de la imagen virtual formada por un espejo plano.

Conocimientos previos

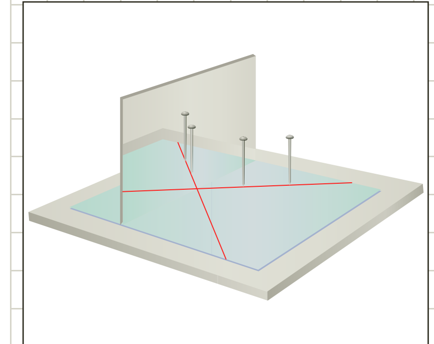
Fenómenos ondulatorios.

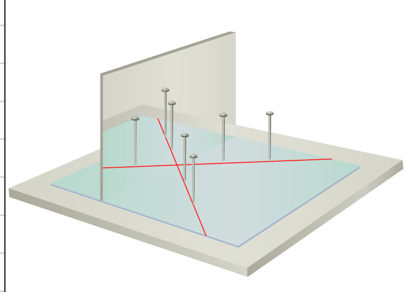
Materiales

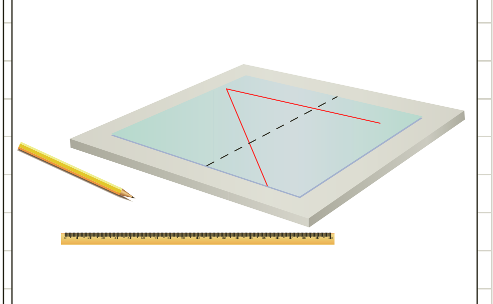
- Un espejo plano
- Hojas de papel tamaño carta
- Alfileres con cabeza de diferentes colores
- Lámina de icopor de 25 × 30 cm
- Un transportador
- Un lápiz y una regla

Procedimiento

1. Coloca la hoja de papel sobre la lámina de icopor.
2. Traza una línea recta en diagonal sobre el papel. Esta línea representará la superficie reflectora.
3. Ubica un alfiler a una distancia aproximada de 10 cm del espejo. Este alfiler se comportará como el objeto emisor de luz.
4. Selecciona un haz de luz proveniente del alfiler objeto colocando otro alfiler en un punto situado entre el espejo y el alfiler objeto.
5. Observa a través del espejo los alfileres y busca una dirección de observación de modo que se vean alineados. Coloca los otros dos alfileres sobre esta línea de observación, que servirá para determinar la dirección del haz reflejado.
6. Retira el espejo y traza dos rectas sobre el papel, una perpendicular a la línea reflectora marcada en el paso 2 y otra sobre la línea que determinó el haz reflejado en el paso 5. Prolóngalas hasta que ambas se crucen.







Análisis de resultados

1. ¿Qué representa el punto de intersección entre las dos rectas?
2. ¿A qué distancia de la línea que representa la superficie reflectora se encuentra el punto de intersección de las rectas?
3. ¿Qué relación existe entre esta distancia y la que hay entre el alfiler objeto y el espejo?

Imágenes producidas por lentes convergentes

Las **lentes convergentes** proporcionan imágenes distorsionadas en cuanto a la forma y al tamaño real de los objetos reflejados en ellas. Esta distorsión se debe, precisamente, a que su superficie reflectante no es plana sino semiesférica. Las lentes convergentes pueden generar imágenes invertidas.

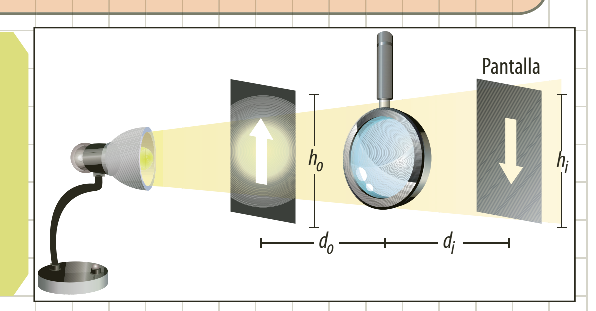
En esta práctica nos propondremos determinar las características de la imagen producida por una lente convergente.

Conocimientos previos

Tipos de lentes y fenómenos ondulatorios.

Materiales

- Fuente de luz
- Trozo de cartulina negra de 8 cm × 8 cm
- Lente convergente (puede ser una lupa)
- Pantalla (cartón blanco)
- Regla
- Lentes utilizados para corregir defectos visuales



Procedimiento

1. Con la cuchilla recorta en la cartulina negra una flecha como se muestra en la figura. Mide el tamaño de la flecha. Este es el tamaño (h_o) a partir del cual determinaremos la imagen producida por la lente, pues la luz que la atraviesa incide en la pantalla.
2. Al armar el montaje, coloca la lente entre el objeto y la pantalla. Para cierta distancia del objeto a la lente convergente, busca con la pantalla el sitio en el cual puedas proyectar la imagen invertida producida por la lente.
3. Mide la distancia del objeto a la lente (d_o) y de la lente a la imagen (d_i). Mide el tamaño de la imagen (h_i). Registra los datos en una tabla como la siguiente.

d_o	d_i	f	h_i	Aumento h_i/h_o

4. Cambia varias veces la posición del objeto con respecto a la lente y determina en cada caso la distancia de la imagen a la lente y el tamaño de la misma. Registra los datos en la tabla.
5. Utiliza la ecuación de las lentes para determinar con cada par de datos d_o y d_i, la distancia focal. Registra los valores en la tabla.

$$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_1} = \frac{1}{f}$$

6. Determina la distancia focal promedio.
7. Calcula el aumento de la lente en cada caso y registra los valores en la tabla.
8. Coloca la lupa contra la luz solar. Al otro lado de la lente, desplaza una hoja de papel para encontrar el punto en el cual se concentran los rayos solares. Este punto es el foco de la lente. Determina la distancia focal de la lente.
9. Mira una ventana a través de algunas de las lentes utilizadas para corregir defectos de visión. Al tacto indica si son convergentes o divergentes.

Análisis de resultados

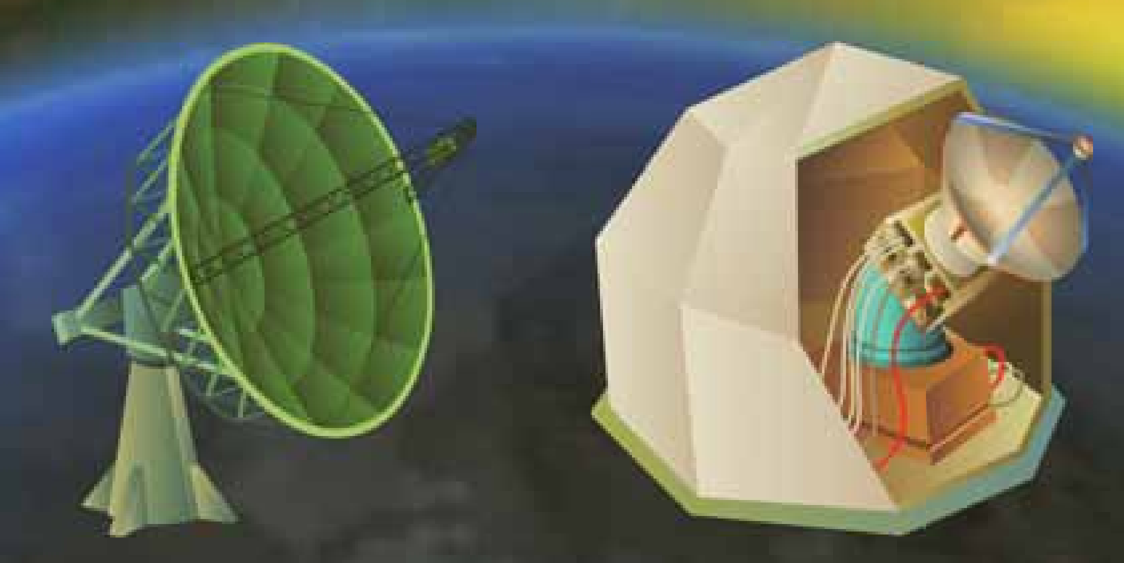
1. ¿De cuántas dioptrías es la lente utilizada?
2. ¿La distancia focal depende de la posición del objeto con respecto a la lente?
3. ¿Podremos utilizar este método para determinar la distancia focal de una lente divergente? Explica tu respuesta.
4. ¿Por qué podemos afirmar que el foco de la lente está ubicado en el punto en el que se concentran los rayos solares?
5. Compara el valor de la distancia focal obtenida con los rayos solares con el valor obtenido a partir de las mediciones.
6. ¿Qué defecto visual corrigen las lentes convergentes y cuál las divergentes?



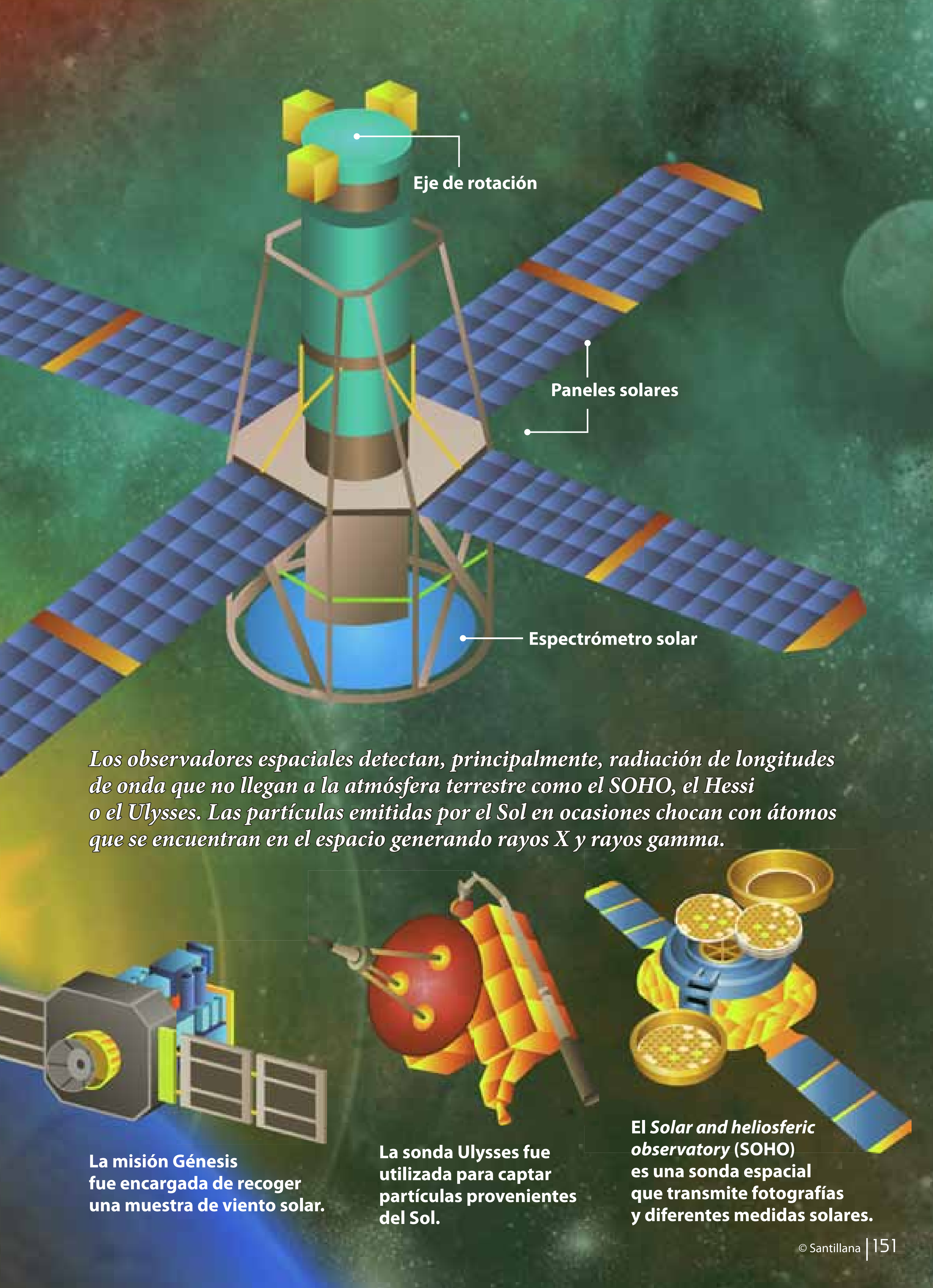
Observatorios que detectan el Sol

El ser humano siempre ha tenido curiosidad por el estudio de los astros. Desde la época de los griegos, pasando por Galileo y Keppler hasta nuestros días, el universo ha sido un total misterio. En la actualidad, la información que se puede obtener es mayor, debido al gran número de observatorios terrestres y espaciales que existen. El estudio del Sol es de importancia en diferentes aspectos como conocer el origen del universo o para ver los riesgos que representa para nuestro planeta.

Los observatorios terrestres se encargan de detectar imágenes que llegan a la superficie de la atmósfera terrestre. Pueden detectar ondas electromagnéticas en el rango de luz visible y algunas en longitudes de onda de radio.



Los observatorios solares terrestres aparte de obtener imágenes, también están dotados de espectrógrafos, que se encargan de descomponer la luz en sus colores iniciales.

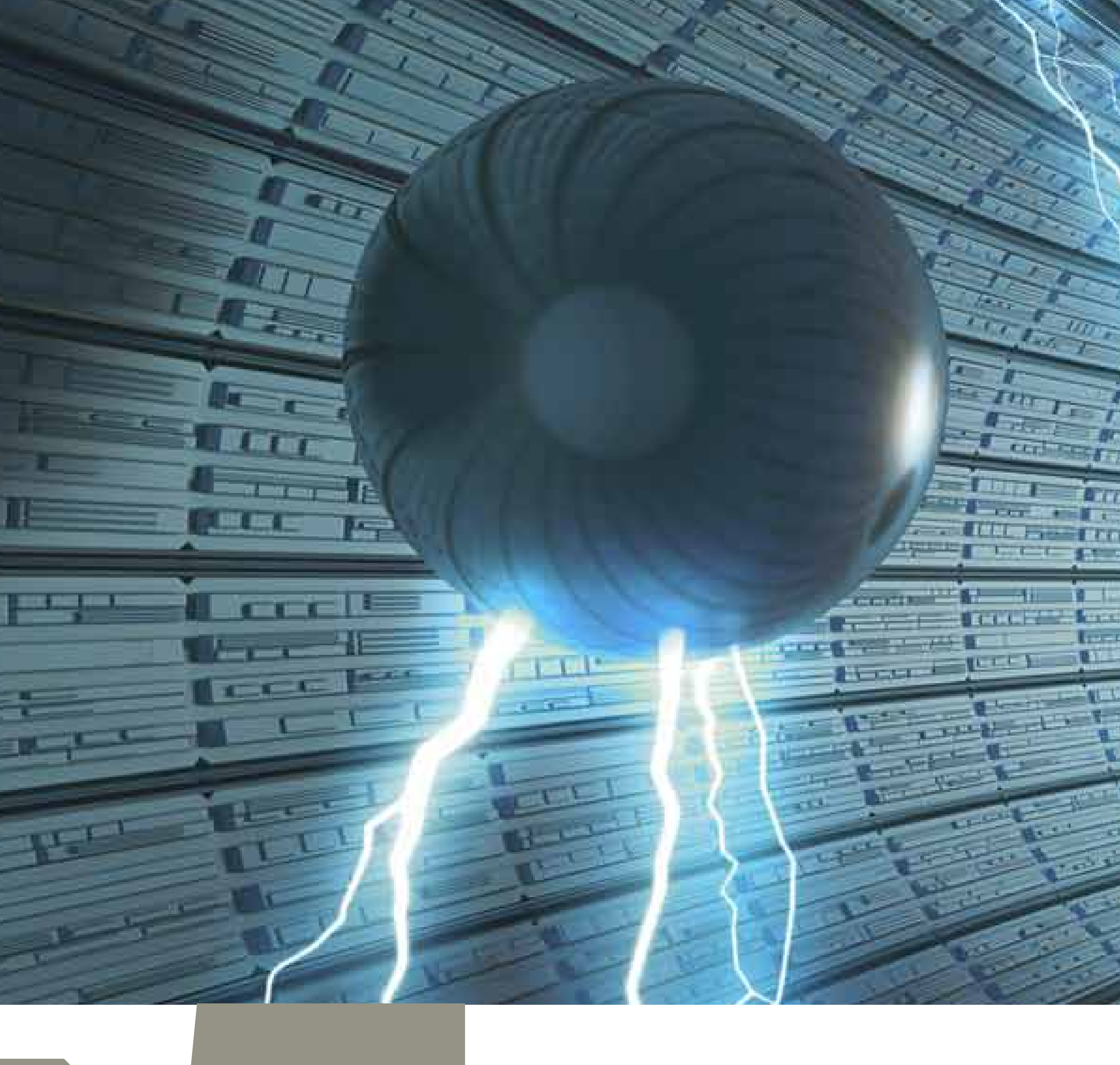


Los observadores espaciales detectan, principalmente, radiación de longitudes de onda que no llegan a la atmósfera terrestre como el SOHO, el Hessi o el Ulysses. Las partículas emitidas por el Sol en ocasiones chocan con átomos que se encuentran en el espacio generando rayos X y rayos gamma.

La misión Génesis fue encargada de recoger una muestra de viento solar.

La sonda Ulysses fue utilizada para captar partículas provenientes del Sol.

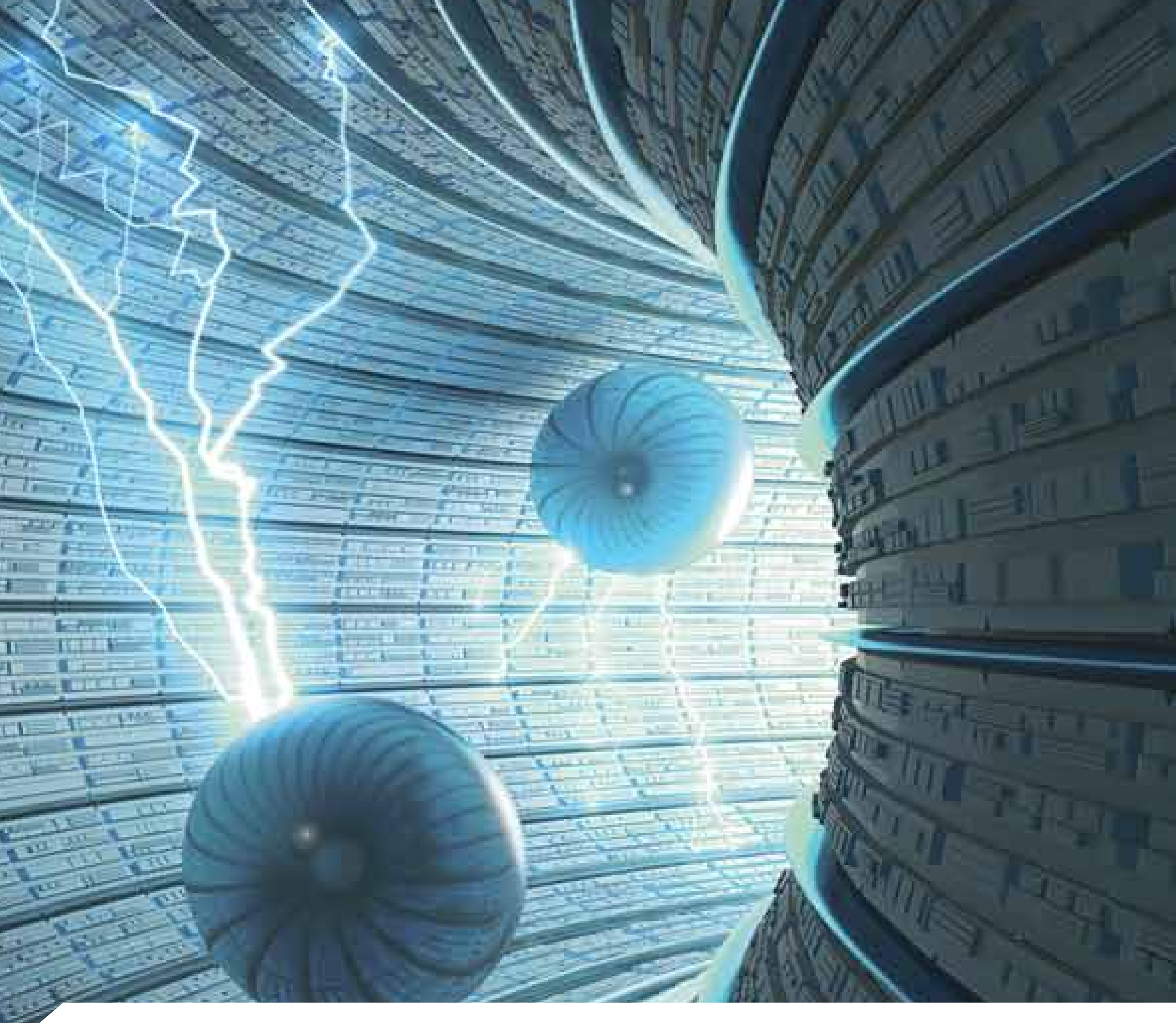
El *Solar and heliosferic observatory* (SOHO) es una sonda espacial que transmite fotografías y diferentes medidas solares.



UNIDAD 5

Electrostática

Temas de la unidad



Para pensar…

¿Alguna vez has notado que cuando te quitas el saco sientes un suave ruido y si te encuentras en un cuarto oscuro, observas que ese ruido proviene de las chispas que salen de tu ropa? ¿O que al acercarte a un objeto metálico sientes una ligera sacudida que atraviesa tu cuerpo? Así como esto ocurre en pequeña escala en tu vida diaria, en la naturaleza otros fenómenos similares se dan con mayor ímpetu, por ejemplo, las descargas eléctricas que observamos durante una tormenta.

Estos fenómenos electrostáticos tienen un origen a nivel microscópico, a partir de la estructura atómica de la materia, cuyas partículas no se pueden ver, pero sí se hacen sentir.

En esta unidad analizaremos el comportamiento de la carga en los diferentes materiales, las leyes que rigen su acumulación y las que rigen la interacción entre las mismas, los conceptos de diferencia de potencial, energía potencial eléctrica y los condensadores.

Para responder…

- ¿Qué es la electricidad?
- ¿Qué usos tiene la electricidad?
- ¿Sabes qué es una carga eléctrica?



Figura 1. Tales de Mileto demostró que al frotar el ámbar con la piel de un animal atraía semillas.

1. La carga eléctrica

1.1 La electricidad

En la Grecia clásica se estudió un fenómeno especial: la propiedad que tenían ciertos cuerpos de atraer objetos livianos después de haber sido frotados con un tejido, inicialmente se creía que el ámbar (resina fósil) era el único material que presentaba esta propiedad. Tales de Mileto realizó experimentos en los cuales demostró que el ámbar, después de ser frotado con la piel de un animal, atraía ciertas semillas. Tales creía que el ámbar tenía una propiedad vital.

Pero en el siglo XVI, el físico inglés William Gilbert descubrió que otras sustancias también podían adquirir la propiedad reseñada. A estas sustancias las denominó sustancias eléctricas y a la propiedad la denominó electricidad, palabra que deriva del griego elektron (ámbar).

Gilbert descubrió que existían dos tipos de carga: un tipo era la que adquiría el vidrio, electricidad vítrea, y otra la correspondiente al ámbar y otros cuerpos semejantes a la que denominó electricidad resinosa.

Posteriormente, en 1733, el físico francés Charles du Fay, estudió las interacciones repulsivas de la electricidad, y encontró que materiales electrizados del mismo tipo se repelían. Un ejemplo de materiales que se repelen son dos varillas de plástico frotadas con piel de animal, contrario a una varilla de vidrio frotada con seda y una varilla de plástico frotada con piel de animal, ya que en este caso las varillas se atraen.

1.2 La electrización

En muchas ocasiones habrás sentido la electrización en el momento en que al peinarte, tu cabello se levanta como si existiera una atracción hacia él. También habrás sentido un leve corrientazo cuando al bajarte de un auto tocas una de sus manijas. Pues bien este fenómeno se denomina electrización y consiste en el poder de atracción que adquieren los objetos después de ser frotados.

El comportamiento eléctrico de los cuerpos está íntimamente relacionado con la estructura de la materia. Los cuerpos están formados por entidades llamadas átomos. En los átomos existen partículas que poseen carga positiva (protones), carga negativa (electrones) y otras partículas cuya carga es neutra (neutrones).

En general, los átomos poseen igual número de protones que de electrones, por lo cual la carga positiva de los primeros se compensa con la negativa de los segundos. Así mismo, el átomo en conjunto, no tiene carga eléctrica neta, por lo tanto, es eléctricamente neutro.

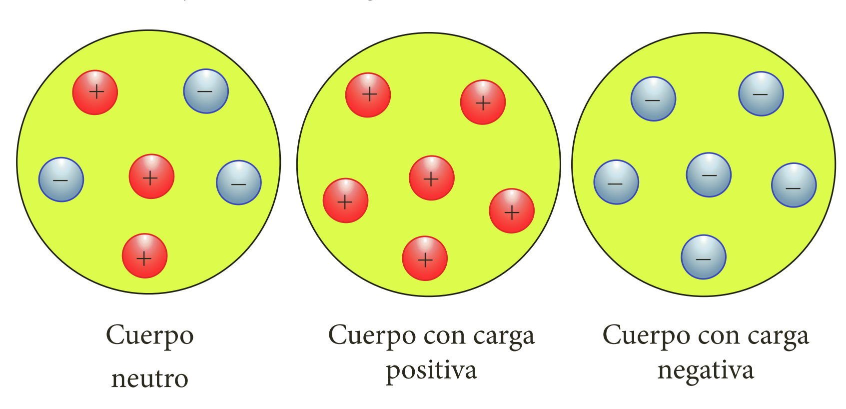
Al someter un cuerpo a ciertas manipulaciones, como la frotación con una barra de vidrio o de plástico electrizador, ese cuerpo puede ganar electrones o perderlos. Esto se debe a que las barras de vidrio o de plástico se electrizan al frotarlas, respectivamente, con seda o con lana. Al frotar la barra de plástico gana electrones de la lana (aumentando carga negativa), y la barra de vidrio cede electrones a la seda (aumentando carga positiva). Es decir, el tipo de carga eléctrica que un cuerpo tiene está en función de que ese cuerpo tenga más o menos electrones que protones.

EJERCICIO

Escribe el nombre de dos objetos, que al frotarlos uno con el otro se electricen.



En la siguiente figura, se representa la composición eléctrica de un cuerpo neutro y un cuerpo cargado.



EJERCICIO

Averigua qué parte de los átomos se puede observar usando el microscopio con efecto de túnel.

Se puede observar que:

- Si un cuerpo tiene carga negativa es porque ha ganado electrones de otros cuerpos y, por tanto, posee más electrones que protones.
- Si un cuerpo tiene carga positiva es porque ha cedido electrones a otros cuerpos y, por tanto, posee menos electrones que protones.

1.3 Cargas eléctricas

El norteamericano Benjamín Franklin, quien realizó distintos descubrimientos en el campo de la electricidad, sugirió la existencia de un único tipo de carga o fluido eléctrico. Cuando la cantidad de la misma en un cuerpo era superior a lo normal, este presentaba **electricidad positiva** (+), la adquirida por el vidrio; y cuando la misma era inferior a lo normal, el cuerpo tenía **electricidad negativa** (−), la adquirida por el ámbar.

La magnitud física que nos indica la cantidad de esa propiedad de la materia se denomina **carga eléctrica** o, simplemente, carga.

La unidad de la carga eléctrica en el SI se denomina coulomb o culombio su símbolo es C.

Franklin propuso que las fuerzas ejercidas entre cuerpos electrizados eran acciones a distancia, unas de tracción y otras de repulsión, cuya ocurrencia dependía del tipo de electrización de dichos cuerpos.

En la actualidad, existen dos tipos de carga a las que por convenio, se les denomina **cargas positivas** (+) y **cargas negativas** (−), y por convenio, se considera como carga eléctrica negativa la que tiene el electrón, mientras la carga del protón se considera como positiva.

Como ya sabes, todos los cuerpos están formados por átomos. En los átomos existen protones, que poseen carga positiva y electrones, con carga negativa. Los protones y los neutrones (partículas sin carga eléctrica) se encuentran en el núcleo, mientras que los electrones se encuentran en el exterior del núcleo. Cada protón (todos iguales) tienen la misma cantidad de carga eléctrica que un electrón (también iguales entre sí), aunque de diferente signo.

Los átomos poseen el mismo número de protones que de electrones, por lo que la carga positiva de los primeros se compensa con la carga negativa de los segundos. Por este motivo, un átomo en conjunto, no posee carga eléctrica neta y se dice que es eléctricamente neutro.

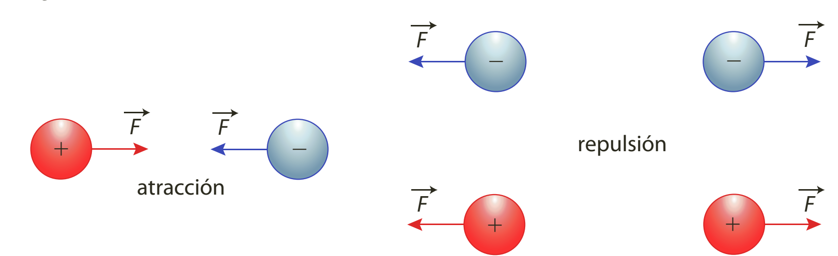


Figura 2. El ámbar electrizado atrae papelitos porque la materia está formada por partículas con carga eléctrica.



Figura 3. En el electroscopio al acercar un cuerpo cargado, las laminillas se separan al quedar cargadas con el mismo tipo de carga.

La transferencia y la interacción entre las cargas producen los fenómenos eléctricos. Esta interacción responde a la ley de signos; según la cual, los cuerpos que tienen carga eléctrica del mismo signo se repelen y los cuerpos que tienen cargas de diferente signo se atraen. En la siguiente figura se muestran estas interacciones.



Se puede observar que entre las cargas eléctricas surgen fuerzas de atracción o de repulsión y el que surja una u otra clase de fuerzas se debe a la característica propia (positiva o negativa) de las cargas que interactúan.

La existencia de la carga eléctrica en un cuerpo se pone de manifiesto mediante un electroscopio (figura 3), dispositivo que consiste en un objeto que se carga al ponerlo en contacto con un cuerpo cargado, de manera que se observa la repulsión entre cuerpos cargados con el mismo tipo de electricidad.

Cuando se acerca un cuerpo cargado eléctricamente, las cargas eléctricas dentro de la varilla se redistribuyen y se observa que las laminillas se separan. El efecto es el mismo cuando se le acerca un cuerpo cargado positivamente que cuando se le acerca un cuerpo cargado negativamente. Por tal razón, el electroscopio permite detectar si un cuerpo está cargado eléctricamente, aunque no permite detectar el tipo de carga eléctrica que posee.

1.4 Conservación de carga

Cuando la fuerza eléctrica que mantiene unidos los electrones al núcleo disminuye, la distancia entre estos y el núcleo aumenta, por lo tanto aquellos electrones que se encuentran débilmente unidos a los átomos, en algunos materiales, pueden ser liberados o transferidos a otros cuerpos. Es decir, que si un cuerpo tiene carga positiva o carga negativa es porque se ha redistribuido su carga eléctrica.

En estas redistribuciones se cumple el **principio de conservación de la carga**. Este principio indica que la cantidad de carga eléctrica en un sistema aislado es constante, es decir, se conserva, ya que puede presentarse un intercambio o movimiento de carga de un cuerpo a otro, pero no se crea ni se destruye.

Por otra parte, la carga eléctrica está cuantizada. Es decir, existe una cantidad mínima de carga y la carga existente en cualquier cuerpo es un múltiplo de esta cantidad.

La carga mínima o carga elemental es la carga del electrón representada por la letra e. Cualquier otra carga eléctrica, ya sea positiva o negativa, será igual a la carga de un número entero de electrones. Como la unidad de carga en el SI es el culombio (C) su equivalencia con la carga del electrón es:

$$1\ \text{C} = 6{,}25 \times 10^{18}\ e$$

$$1\ e = \frac{1}{6{,}25 \times 10^{18}} = 1{,}6 \times 10^{-19}\ \text{C}$$



1.4.1 Conductores y aislantes

En los fenómenos eléctricos se observa que el comportamiento de la materia respecto a la transmisión de electricidad es muy diverso. Existen medios materiales en los que las cargas eléctricas no se transmiten, estas sustancias son denominadas aislantes o dieléctricos. Entre ellos se encuentran la seda, el vidrio, la madera, la porcelana, etc.

Por el contrario, hay otros materiales en los que las cargas eléctricas se transmiten con facilidad. En este caso se dice que los medios son conductores. Los medios conductores más característicos son los metales.

Algunos elementos como el silicio o el germanio presentan una oposición intermedia entre los aislantes y los conductores, pero distinta. A estos elementos se les denomina semiconductores. El aire y la mayoría de los gases, normalmente son malos conductores, ya que solo conducen electricidad en ocasiones especiales.

Los semiconductores se utilizan en la construcción de transistores y son de gran importancia en la electrónica.

Desde un punto de vista atómico, en un conductor los electrones se encuentran ligados con menor firmeza, por lo cual pueden moverse con mayor libertad dentro del material. En el interior de un material aislante los electrones se encuentran ligados muy firmemente a los núcleos, por tanto no existen electrones libres. Mientras en un semiconductor la existencia de electrones libres es mínima.

En 1911, el físico holandés Keike Kamerling Onnes (figura 4) descubrió que algunos materiales, al ser expuestos a temperaturas muy bajas aproximadamente al cero absoluto, cerca de −273°C, mejoraban su conductividad notablemente, y ofrecían una resistencia casi nula al movimiento de las cargas eléctricas. Este fenómeno se denominó superconductividad. Posteriormente, en 1987, se descubrió la s**uperconductividad** a temperaturas más altas (temperaturas mayores a 100 K, es decir, −173 °C).

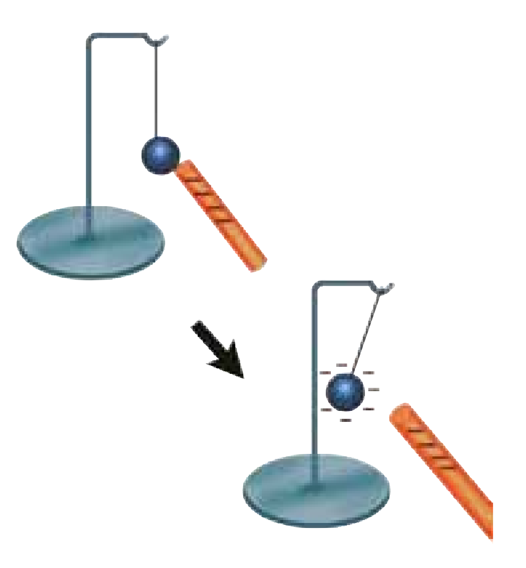


Figura 4. La superconductividad fue descubierta por el físico holandés Keike Kamerling Onnes, quien fue Premio Nobel de Física en 1913.

1.4.2 Carga por contacto y carga por inducción

Hasta el momento, hemos estudiado aquellos objetos cargados por frotamiento, también es posible cargar un cuerpo por contacto y por inducción.

- **Carga por contacto:** al poner en contacto un cuerpo electrizado con otro sin carga eléctrica, se genera un paso de electrones entre el primer cuerpo y el segundo, produciéndose la electrización de este último. Por ejemplo, cuando frotas un esfero plástico y lo acercas a algunos trozos de papel, estos se adhieren al esfero, pero al cabo de unos segundos, se desprenden. Esto se debe a la transferencia de electrones libres desde el cuerpo que los tiene en mayor cantidad hacia el cuerpo que los tiene en menor proporción, manteniéndose este flujo hasta que la magnitud de la carga sea la misma en ambos cuerpos.





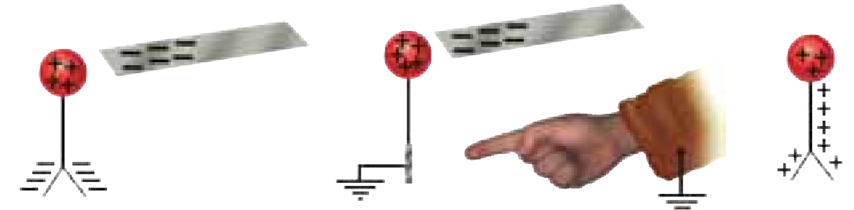

- **Carga por inducción:** al aproximar un cuerpo cargado a otro cuerpo, preferiblemente conductor, que no está cargado, este cuerpo se polariza, es decir, una de sus partes se carga positivamente y la otra, negativamente.

  El fenómeno se debe a que el cuerpo cargado atrae las cargas de distinto signo y repele a las del mismo signo.

Ahora, si se toca con un dedo el conductor polarizado la porción de carga negativa se desplazará a través de nuestro cuerpo, y de esta manera, la carga positiva se redistribuirá quedando el cuerpo cargado eléctricamente.

Este procedimiento de cargar objetos eléctricamente se denomina carga por inducción.

En la siguiente figura, se muestra la carga de un electroscopio por inducción.



Durante una tormenta se producen efectos de carga por inducción. La parte inferior de las nubes, de carga negativa, induce carga positiva en la superficie de la Tierra. Los gases, en general, son buenos aislantes, pero si la carga negativa de un objeto se aumenta suficientemente, los electrones pueden ser enviados al gas circundante produciendo lo que conocemos como una chispa. Cuando los electrones saltan de la nube a la Tierra se produce el relámpago.

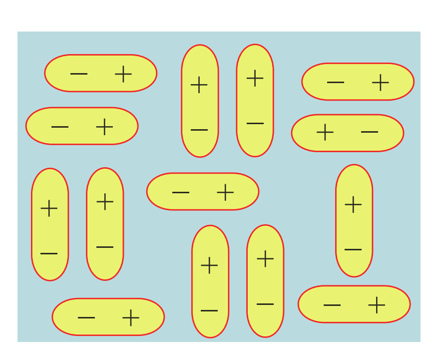
1.4.3 Polarización de la carga

En el ejemplo de la carga por inducción se ilustró el proceso de polarización para el caso de los materiales conductores. En el cual se pudo concluir que, cuando un cuerpo neutro reorganiza sus cargas por acción o por influencia de un cuerpo cargado, se dice que el cuerpo está polarizado.

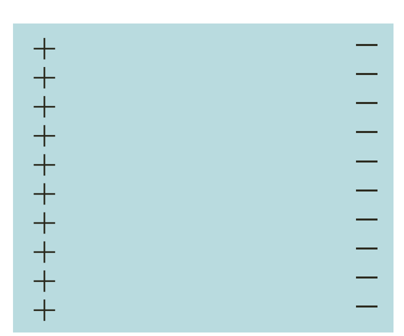
Ahora, veamos lo que sucede en el caso de los aislantes. Considera un aislante, no electrizado cuyas moléculas se encuentran distribuidas al azar.

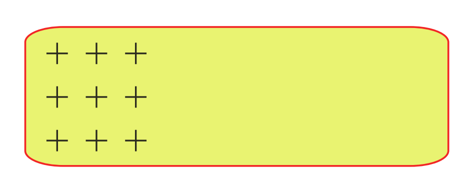
Al acercar un objeto electrizado (por ejemplo con carga positiva) al material aislante, la carga de este actúa sobre las moléculas del aislante haciendo que se orienten y se ordenen de tal forma que sus cargas negativas se ubiquen lo más cerca posible del objeto cargado positivamente. El efecto de este proceso se denomina polarización y se representa en la siguiente figura.

Aislante no electrizado



Aislante electrizado







1.5 Fuerza entre cargas

1.5.1 La ley de Coulomb

Los cuerpos cargados experimentan una cierta interacción de atracción o de repulsión entre ellos. La fuerza que caracteriza esta interacción depende de las distancias entre los cuerpos y de la cantidad de carga eléctrica.

El físico francés Charles Coulomb (figura 5), utilizando una balanza de torsión, estudió las fuerzas con las que se atraían o repelían los cuerpos cargados. Estas fueron sus conclusiones:

- Las fuerzas eléctricas aparecen sobre cada una de las dos cargas que interactúan, y son de igual magnitud e igual línea de acción, pero de sentidos opuestos.
- Las fuerzas eléctricas dependen de los valores de las cargas. Cuanto mayor sean esos valores, mayor será la fuerza con la que se atraen o repelen.
- Las fuerzas eléctricas dependen de la distancia que separa las cargas: cuanto mayor sea esa distancia, menor será la fuerza entre ellas.
- Las fuerzas eléctricas dependen del medio en el que están situadas las cargas. No es igual la fuerza entre dos cargas cuando están en el vacío que cuando están en otro medio material, como el aceite o el agua.

El método para medir la carga se estableció ocho décadas después de las investigaciones de Coulomb y se definió en términos de la corriente eléctrica. La unidad natural de la carga eléctrica es la unidad de la cantidad de carga que tiene un electrón; pero, al ser una cantidad muy pequeña, el SI define como unidad de carga eléctrica el culombio (C). El cual es la carga eléctrica que, situada a 1 metro de otra de igual magnitud y signo, la repele con una fuerza de 9×10^9 N.

Una carga de un culombio equivale a $6{,}25 \times 10^{18}$ veces la carga de un electrón. Como es muy grande, con frecuencia se utiliza un submúltiplo de ella, el microculombio (μC), que equivale a la millonésima parte del coulomb.

Estos factores se resumen en la **ley de Coulomb**, que permite calcular la intensidad de fuerza de atracción o repulsión de dos cargas puntuales.

Definición

Ley de Coulomb

Las fuerzas eléctricas de atracción o de repulsión entre dos cargas puntuales, q_1 y q_2, es directamente proporcional al producto de las cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa.

Esta ley se expresa como:

$$F = K\frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$

La constante K es la constante electrostática, se expresa en $N \cdot m^2/C^2$ y su valor depende del medio material en cual se encuentran las cargas. En el vacío la constante electrostática tiene un valor de $K = 9 \times 10^9\ N \cdot m^2/C^2$.

El enorme valor de la constante electrostática nos indica que las fuerzas eléctricas son intensas. Si la fuerza tiene signo menos, indica una fuerza de atracción entre las dos cargas y si es de signo positivo indica una fuerza de repulsión.



Figura 5. Charles Coulomb determinó que a mayor distancia entre dos fuerzas, menor es la fuerza que se ejerce entre ellas.

EJEMPLOS

1. **Dos cargas puntuales se encuentran cargadas con 3 μC y −4 μC. Si se acercan a una distancia de 1 cm, ¿cuál es la fuerza de atracción entre ellas?**

Solución:

Como las unidades de K están en el SI, entonces:

$q_1 = 3 \times 10^{-6}$ C, $q_2 = -4 \times 10^{-6}$ C, $r = 0{,}01$ m *Al convertir al SI*

A partir de la ley de Coulomb,

$$F = K\frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$

$$F = (9 \times 10^9\ \text{N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2)\frac{(3 \times 10^{-6}\ \text{C})(-4 \times 10^{-6}\ \text{C})}{(0{,}01\ \text{m}^2)}$$ *Al remplazar*

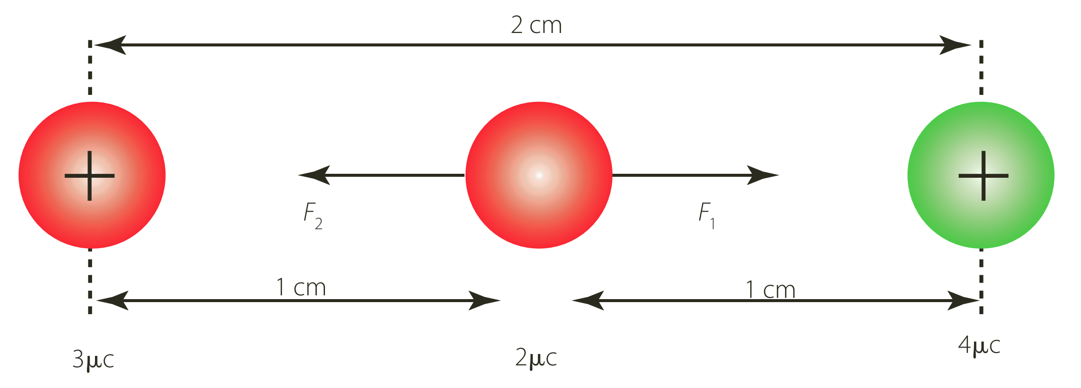
$F = -1.080$ N *Al remplazar*

La fuerza de atracción entre las dos cargas es de 1.080 N.

2. **Dos cargas puntuales positivas de 3 μC y 4 μC se encuentran en el aire separadas 2 cm. Calcular la fuerza resultante que las cargas ejercen sobre otra también positiva de 2 μC situada en el punto medio de la línea que une las dos primeras.**

Solución:

Como las tres cargas tienen el mismo signo, las dos primeras ejercen una fuerza de repulsión sobre la tercera, por lo que esta está sujeta a dos fuerzas de sentidos contrarios como se observa en la figura. Al ser esta fuerza una magnitud vectorial, la norma de la resultante es la diferencia entre las normas de las fuerzas aplicadas.



Por tanto:

$$F_1 = K\frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$

$$F_1 = (9 \times 10^9\text{N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2)\frac{(3 \times 10^{-6}\ \text{C})(2 \times 10^{-6}\ \text{C})}{(0{,}01\ \text{m})^2} = 540\ \text{N}$$ *Al remplazar y calcular*

$$F_2 = K\frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$

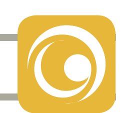
$$F_2 = (9 \times 10^9\text{N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2)\frac{(2 \times 10^{-6}\ \text{C})(4 \times 10^{-6}\ \text{C})}{(0{,}01\ \text{m})^2} = 720\ \text{N}$$ *Al remplazar y calcular*

Entonces,

$F_{total} = F_1 - F_2$

$F_{total} = 720\ \text{N} - 540\ \text{N} = 180\ \text{N}$ *Al remplazar y calcular*

La fuerza resultante tiene una norma de 180 N y tiene el mismo sentido que F_2.



1.5.2 La fuerza eléctrica en otros materiales

La fuerza eléctrica depende de la constante electrostática K, la cual se definió para el vacío y que, en términos prácticos, es la misma para el aire. Si el medio es otro, esta constante presenta variaciones notables de tal forma que la fuerza electrostática entre los cuerpos cargados presenta variaciones. Según el medio, la constante electrostática K, se expresa como:

$$K = \frac{9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2}{k_d}$$

La constante k_d es la constante dieléctrica del medio material y no tiene unidades. En la tabla 5.1 se muestran algunos valores para la constante dieléctrica.

Tabla 5.1

Valores de la constante dieléctrica, k_d	
Vacío	1
Aire	1
Vidrio	4,5
Aceite	4,6
Mica	5,4
Agua	81

EJEMPLOS

1. **Calcular la fuerza entre dos cargas cuyos valores son −1 C y 2 C, que se encuentran en el agua separadas una distancia de 1 cm.**

Solución:

De acuerdo con la tabla 5.1, calculamos la k_d del agua, entonces:

$$K = \frac{9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2}{k_d}$$

$$K = \frac{9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2}{81}$$ *Al remplazar*

$$K = 1,1 \times 10^8 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$$ *Al calcular*

Por tanto, la fuerza eléctrica es:

$$F = K\frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$

$$F = (1,1 \times 10^8 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2)\frac{(2 \times 10^{-6} \text{ C})(-1 \times 10^{-6} \text{ C})}{(0,01 \text{ m})^2}$$ *Al remplazar*

$$F = -2,2 \text{ N}$$ *Al calcular*

En el agua, las dos esferas se atraen con una fuerza de −2,2 N.

2. **Una carga puntual positiva de 2 μC se encuentra separada 50 cm de otra carga negativa de 5 μC. Determinar la fuerza con la que interactúan cuando se encuentran en el aire y cuando se encuentran en el aceite.**

Solución:

Ya que las cargas son de distinto signo, aparecen entre ellas fuerzas de atracción que se representan en la figura.

La norma de la fuerza que actúa en cualquiera de las cargas se calcula mediante la ley de Coulomb.

Como las unidades de K están en el SI, entonces:

$q_1 = 2 \times 10^{-6}$ C, $q_2 = -5 \times 10^{-6}$ C, $r = 0,5$ m *Al convertir al SI*

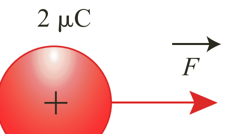
A partir de la ley de Coulomb, $F_{aire} = K\frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$

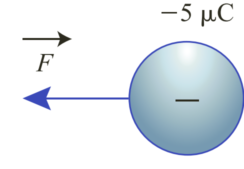
$$F_{aire} = (9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2)\frac{(2 \times 10^{-6} \text{ C})(-5 \times 10^{-6} \text{ C})}{(0,5 \text{ m})^2}$$

$$F_{aire} = -0,36 \text{ N}$$

$$F_{aire} = \frac{K}{k_d} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$

$$F_{aire} = \frac{(9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C})^2}{4,6} \cdot \frac{(2 \times 10^{-6} \text{ C})(-5 \times 10^{-6} \text{ C})}{(0,5 \text{ m})^2} = -0,08 \text{ N}$$





50 cm

En el aire interactúan con una fuerza de −0,36 N y en el aceite con una fuerza de −0,08 N.

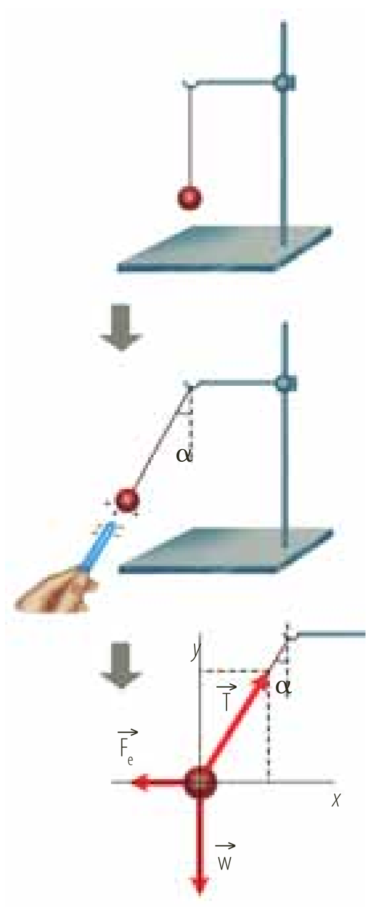


Figura 6. Péndulo electrostático con el cual se puede calcular experimentalmente la fuerza electrostática, mediante un análisis dinámico.

1.5.3 Medida de la fuerza electrostática

Es posible encontrar la fuerza eléctrica entre dos cuerpos cargados, al suspender una pequeña esfera metálica en un hilo delgado y colgar el conjunto en un soporte aislante. Este conjunto se llama péndulo electrostático. Si se electrifica la esfera negativamente por conducción, al acercarle una barra de vidrio cargada, se puede verificar que la esfera abandona su posición de equilibrio (figura 6).

En esta posición, la esfera se encuentra en equilibrio, por tanto, la suma de las fuerzas que actúan sobre ella es cero. En consecuencia, podemos escribir:

$$\Sigma F_x = T \cdot \text{sen}\,\alpha - F_e = 0$$
$$\Sigma F_y = -w + T \cdot \cos\alpha = 0$$

Por tanto:

$$T = \frac{F_e}{\text{sen}\,\alpha} \quad \text{y} \quad T = \frac{w}{\cos\alpha}$$

Al igualar T, tenemos que:

$$\frac{F_e}{\text{sen}\,\alpha} = \frac{w}{\cos\alpha}$$

$$F_e = \frac{w \cdot \text{sen}\,\alpha}{\cos\alpha} = w\frac{\text{sen}\,\alpha}{\tan\alpha}$$

$$F_e = w \cdot \tan\alpha$$

Por tanto, es posible obtener experimentalmente el valor de la fuerza electrostática ejercida sobre un péndulo electrostático, si se mide el peso de la esfera y la amplitud del ángulo que forma el hilo con la vertical.

✱ EJEMPLO

Calcular la fuerza que se ejerce sobre una carga puntual de 5 μC por la acción de otras dos cargas eléctricas de 2 μC cada una, también puntuales, situadas todas ellas en los puntos representados en la figura.

$q_2 = 2\,\mu C$ (+) $q_1 = 5\,\mu C$ (+) $q_3 = 2\,\mu C$ (−)

$F_{2,1}$ $F_{2,3}$ 2 m

Solución:

El sistema de cargas queda representado en la figura:

$$F_{2,1} = K\frac{q_1 \cdot q_2}{r_{1,2}^2} = (9 \times 10^9\ \text{N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2)\frac{(5 \times 10^{-6}\ \text{C})(2 \times 10^{-6}\ \text{C})}{(1\ \text{m})^2} = 0{,}09\ \text{N}$$

$$F_{3,1} = K\frac{q_1 \cdot q_3}{r_{1,3}^2} = (9 \times 10^9\ \text{N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2)\frac{(5 \times 10^{-6}\ \text{C})(2 \times 10^{-6}\ \text{C})}{(1\ \text{m})^2} = 0{,}09\ \text{N}$$

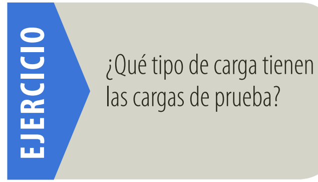
Por tanto, la fuerza neta es:

$$\vec{F}_N = \vec{F}_{2.1} + \vec{F}_{3.1}$$
$$F_N = (0{,}09\ \text{N} + 0{,}09\ \text{N})$$
$$F_N = 0{,}18\ \text{N}$$

2. Campo eléctrico y potencial eléctrico

2.1 Campo eléctrico

Sabemos que la fuerza eléctrica es una fuerza a distancia y que los objetos cargados se consideran como cargas puntuales, cuya norma está determinada por la ley de Coulomb.



Todo lo anterior se ha presentado bajo el punto de vista newtoniano. Por ello, cuando se habla de campo, pasamos a otra forma de concebir el fenómeno eléctrico, ya que no consideramos fuerzas a distancia sino que, en presencia de una carga, el espacio se modifica, de tal manera que si colocamos pequeñas cargas (llamadas cargas de prueba y por convención son positivas) siguen una dirección determinada.

Esta deformación o alteración del espacio se denomina **campo eléctrico**. La carga crea una tensión en el campo que obliga a las pequeñas cargas a moverse hacia ella o a alejarse de ella. En donde, a mayor carga mayor es la deformación o alteración del espacio que rodea el objeto eléctricamente cargado. Es como la deformación de una superficie elástica causada al colocar un objeto pesado, la cual se hunde y todo objeto liviano que cae sobre él describe una trayectoria determinada.

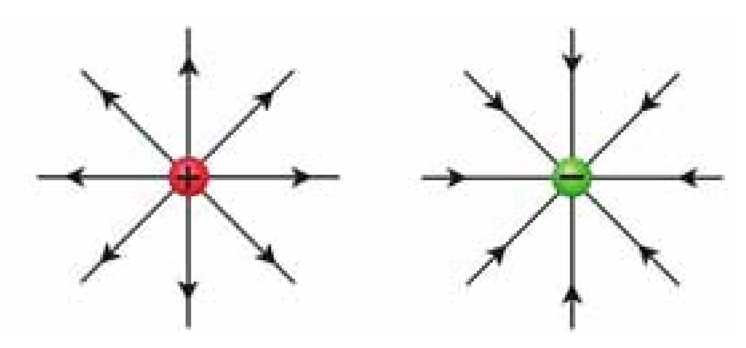
Michael Faraday fue quien introdujo el término de campo eléctrico para referirse a la influencia que ejerce un objeto cargado eléctricamente sobre el espacio que lo rodea.

2.1.1 Las líneas de fuerza

Las líneas de fuerza son las líneas que se utilizan para representar gráficamente un campo eléctrico, las cuales son tangentes, en cada punto, a la intensidad del campo.

De la observación de un campo electrostático podemos apreciar el valor de su intensidad en una zona o un punto determinado por la densidad de líneas. En las zonas de mayor intensidad, la densidad de líneas es mayor (las líneas están más cercanas) que en las zonas de menor intensidad (las líneas están más separadas).

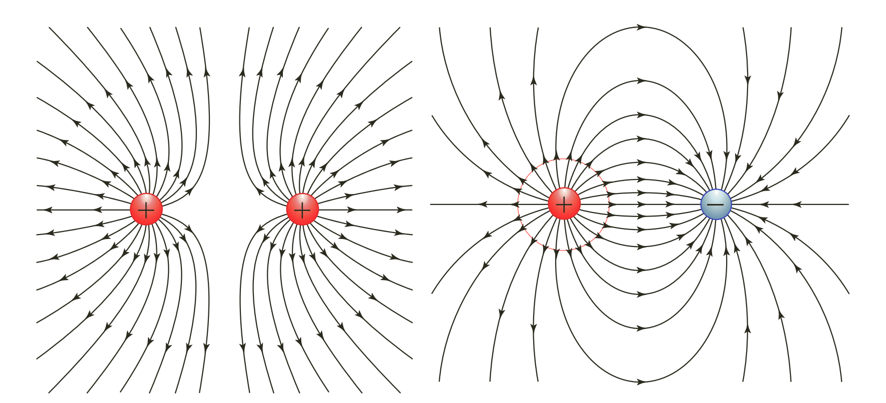
En la siguiente figura se representan las líneas de fuerza del campo creado por una carga puntual (+) y por una carga puntual negativa (−).



Se puede observar que, en los puntos más cercanos al objeto cargado, las líneas están más cerca unas a otras, debido a que en las regiones donde hay más concentración de líneas de fuerza, es mayor la fuerza sobre la carga de prueba.

De igual manera, podemos decir que en las regiones donde hay menor concentración de líneas de fuerza, menor es la fuerza que experimenta la carga de prueba.

Las líneas de fuerza de un campo eléctrico se pueden materializar, al producir campos eléctricos intensos. La siguiente figura muestra el campo producido por dos cargas:



Considerando la figura anterior, podemos deducir una importante característica de las líneas de fuerza, que consiste en que ninguna de estas líneas podrá cruzarse, ya que en cada punto existe una única dirección para el campo eléctrico y, en consecuencia, por cada punto pasa una única línea de fuerza.

2.1.2 Intensidad del campo eléctrico

Toda carga (llamada fuente) da lugar a fuerzas sobre cargas ubicadas en su proximidad. Por lo tanto, es válido suponer que el espacio que rodea a cualquier carga fuente se caracteriza por el hecho de que cualquier carga puesta próxima a ella estará sometida a una fuerza eléctrica.

Para identificar un campo eléctrico se utiliza una magnitud física denominada **intensidad del campo eléctrico**.

Definición

La intensidad del campo eléctrico (E) en un punto dado es el cociente entre la fuerza (F) que el campo ejerce sobre una carga de prueba situada en ese punto y el valor (q) de dicha carga.

La intensidad del campo eléctrico se expresa como:

$$E = \frac{F}{q}$$

La unidad del campo eléctrico en el SI es el newton sobre culombio (N/C).

Como la fuerza es un vector, el campo eléctrico también lo es. Por tanto, el valor del vector campo eléctrico es igual a la fuerza que en dicho punto experimenta una carga eléctrica positiva, es decir:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

La dirección y el sentido del vector campo eléctrico coinciden con la dirección y el sentido de la fuerza que actúa sobre la carga prueba colocada en dicho punto.

En la figura 7, se representa el vector intensidad del campo eléctrico, generado por una carga. Se observa que la dirección de estos vectores es igual a la dirección de la fuerza eléctrica y sus normas dependen de la distancia a la carga.

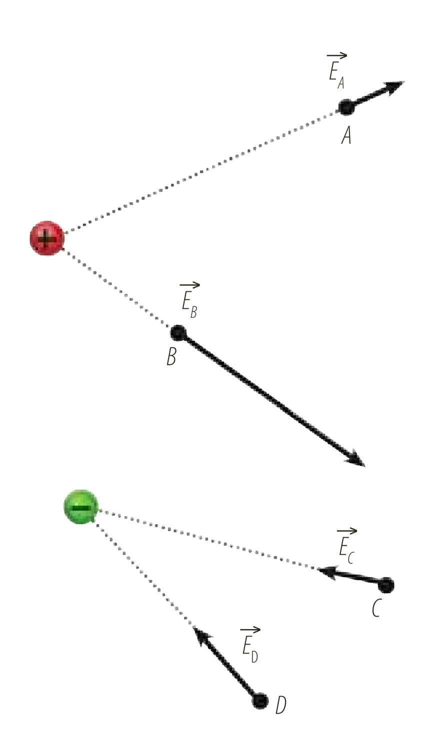


Figura 7. Norma y dirección del vector campo eléctrico.

✱ EJEMPLO

Calcular la norma y la dirección de la fuerza que experimenta una carga negativa de $6 \cdot 10^{-9}$ C, si se encuentra dentro de un campo eléctrico de intensidad 4 N/C.

Solución:

Para hallar la dirección y la norma de la fuerza que experimenta la carga, tenemos que:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

$$\vec{F} = \vec{E} \cdot q \qquad \textit{Al despejar } \vec{F}$$

$$F = (4\ \text{N/C})(-6 \times 10^{-9}\ \text{C}) \qquad \textit{Al remplazar}$$

$$F = -24 \times 10^{-9}\ \text{N} \qquad \textit{Al calcular}$$

La magnitud de la fuerza es de -24×10^{-9} N, el signo negativo indica que la dirección es opuesta a la del campo por tratarse de una carga negativa.

2.1.3 Campo eléctrico originado por cargas puntuales

El valor de la intensidad del campo en cada punto depende del valor y de la posición del punto de la carga o las cargas que crean el campo eléctrico. Para ello, analizaremos el campo producido por una carga puntual, el campo producido por varias cargas puntuales y el campo producido por una carga esférica.

Campo eléctrico producido por una carga puntual

Para calcular la intensidad del campo eléctrico producido por una carga puntual Q en un punto P situado a una distancia r de Q, considera una carga prueba q ubicada en P. Al ubicar la carga prueba en dicho punto, quedará sujeta a una fuerza eléctrica *(F)*, cuyo valor está determinado por la ley de Coulomb, así:

$$F = K\frac{q \cdot Q}{r^2}$$

Como, $E = \frac{F}{q}$, entonces el campo eléctrico es:

$$E = \frac{F}{q} = K \cdot \frac{\frac{q \cdot Q}{r^2}}{q}$$

Es decir:

$$E = K\frac{Q}{r^2}$$

Por tanto, el campo eléctrico creado por una carga puntual Q en un punto P ubicado a una distancia r de la misma, es directamente proporcional al valor de la carga Q e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia al punto considerado.

Al representar el vector $\vec{E}$, en algunos puntos del espacio que rodea a Q, se obtiene una distribución de vectores con la propiedad de tener igual valor en todos los puntos que equidistan de la carga. El valor del campo disminuye cuando la distancia a la carga Q aumenta.

En la figura 8, se representa el campo eléctrico creado por una carga Q positiva y una carga Q negativa, sobre una carga de prueba positiva.

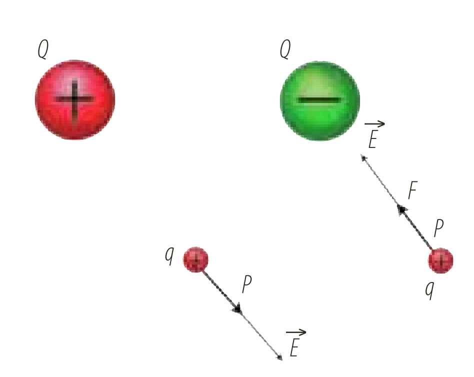


Figura 8. Campo eléctrico que experimenta una carga de prueba generado por una carga positiva y una carga negativa.

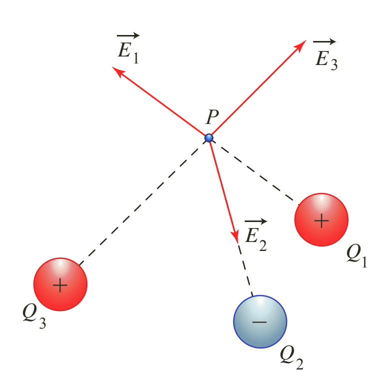


Figura 9. El campo eléctrico resultante sobre el punto *P*, es la suma vectorial de los campos generados por cada carga en ese punto.

Campo eléctrico producido por varias cargas puntuales

Si el campo eléctrico está formado por varias cargas, como se representa en la figura 9, para calcular la intensidad del campo en un punto *P*, se determina la intensidad del campo creado por cada carga mediante la ecuación:

$$E = K\frac{Q}{r^2}$$

Se puede observar que el campo eléctrico $\vec{E}$ existente en el punto *P*, estará dado por la resultante de los campos $\vec{E}_1$, $\vec{E}_2$, $\vec{E}_3$, producidos individualmente por la cargas Q_1, Q_2, Q_3, es decir,

$$\vec{E}_R = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3$$

Por tanto, la intensidad del campo en el punto *P*, es la suma vectorial del campo creado por cada carga.

Campo eléctrico producido por una carga esférica

El campo eléctrico de una esfera con carga *Q*, distribuida uniformemente, es igual al campo eléctrico producido por una carga puntual (*Q*') ubicada en el centro de la esfera, es decir:

$$E = K\frac{Q}{r^2}$$

Donde *r*, es la distancia del punto *P* al centro de la esfera. En la figura 10, se representa el vector del campo eléctrico creado por una carga esférica, en un punto *P*.

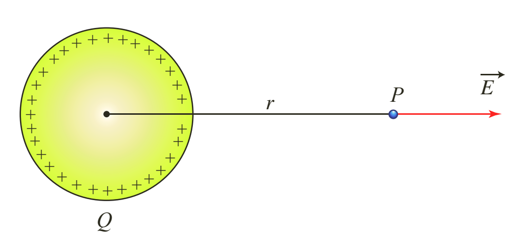
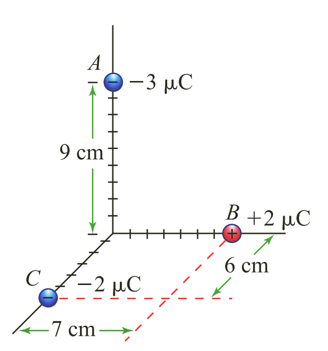


Figura 10. Lector del campo eléctrico creado por una carga esférica en *P*.

EJEMPLO

La figura muestra la disposición de tres cargas puntuales: $Q_1 = -3\ \mu C$, $Q_2 = 2\ \mu C$ y $Q_3 = -2\ \mu C$, ubicadas sobre cada uno de los ejes de un sistema tridimensional. Determinar la intensidad del campo eléctrico en el origen del sistema de referencia.



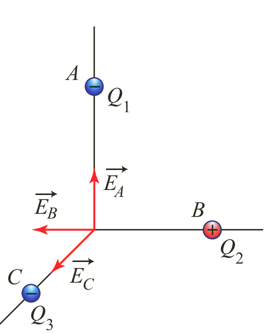
Solución:

Para determinar la intensidad del campo eléctrico en el origen, graficamos las intensidades del campo producidas por cada carga. Por tanto:

$$E_A = K \cdot \frac{Q_A}{r^2} = (9 \times 10^9\ \text{N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2)\frac{(-3 \times 10^{-6}\ \text{C})}{(9 \times 10^{-2}\ \text{m})^2} = -33{,}3 \times 10^5\ \text{N/C}$$

$$E_B = K \cdot \frac{Q_B}{r^2} = (9 \times 10^9\ \text{N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2)\frac{(2 \times 10^{-6}\ \text{C})}{(7 \times 10^{-2}\ \text{m})^2} = 36{,}7 \times 10^5\ \text{N/C}$$

$$E_C = K \cdot \frac{Q_C}{r^2} = (9 \times 10^9\ \text{N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2)\frac{(-2 \times 10^{-6}\ \text{C})}{(6 \times 10^{-2}\ \text{m})^2} = -50 \times 10^5\ \text{N/C}$$



Entonces:

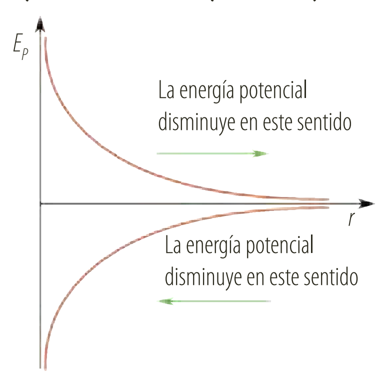
$$E_R = \sqrt{E_A^2 + E_B^2 + E_C^2}$$
$$= \sqrt{(-33{,}3 \times 10^5\ \text{N/C})^2 + (36{,}7 \times 10^5\ \text{N/C})^2 + (-50 \times 10^5\ \text{N/C})^2} = 70{,}39 \times 10^5\ \text{N/C}$$

La intensidad del campo eléctrico en el origen del sistema es $70{,}39 \times 10^5$ N/C.

2.2 Potencial eléctrico

2.2.1 Energía potencial eléctrica

Un objeto puede almacenar energía debido a su posición con respecto a algún otro objeto. A esta energía se le llama energía potencial porque en su estado almacenado tiene el potencial de realizar un trabajo. En el campo gravitacional, por ejemplo, entre más alto se encuentre un objeto, mayor es la energía potencial que tiene, pues hay mayor distancia con respecto al suelo. Al dejar el objeto en libertad, este cae hacia el suelo y disminuye su energía potencial pero aumenta su energía cinética. La energía cinética desarrollada será mayor cuanto más lejos esté del suelo y, en consecuencia, el campo gravitacional haya hecho un mayor trabajo.



En los campos eléctricos sucede lo mismo. Imagina que hay un campo eléctrico debido a una carga negativa. Al poner una carga de prueba (recuerda que estas son positivas y su carga es muy pequeña) esta se moverá hacia la carga negativa, y aumentará su energía cinética, pero disminuirá su energía potencial eléctrica. Cuanto más lejos se ubiquen la carga de prueba con respecto a la carga negativa, mayor capacidad tiene el campo eléctrico de realizar trabajo. Por tanto, mayor será la capacidad de la carga para desarrollar energía cinética.

Ahora, si consideramos que el campo es generado por una carga positiva, la carga de prueba desarrollará menor energía cinética entre más cerca se encuentre de la carga, es decir que, a menor distancia con respecto a la carga, mayor energía potencial tiene. Así mismo, el campo eléctrico puede realizar más trabajo sobre la carga de prueba a medida que esta se encuentre cerca de la carga que genera el campo. En este caso, la energía potencial es cero si la carga de prueba se encuentra muy lejos, en el infinito.

2.2.2 Potencial eléctrico

Cuando se trabaja con partículas cargadas en campos eléctricos, es más conveniente considerar la energía potencial por unidad de carga, a este concepto se le llama potencial eléctrico.

Definición

El potencial en un punto del campo eléctrico es la energía potencial de la unidad de carga positiva en ese punto.

El potencial eléctrico se expresa como:

$$V = \frac{E_p}{q}$$

La unidad del potencial eléctrico en el SI es el voltio (V), que equivale a un julio sobre culombio (J/C). Un voltio representa el potencial que existe en un punto en el que, al colocar una carga de un culombio, adquiere una energía potencial de un julio.

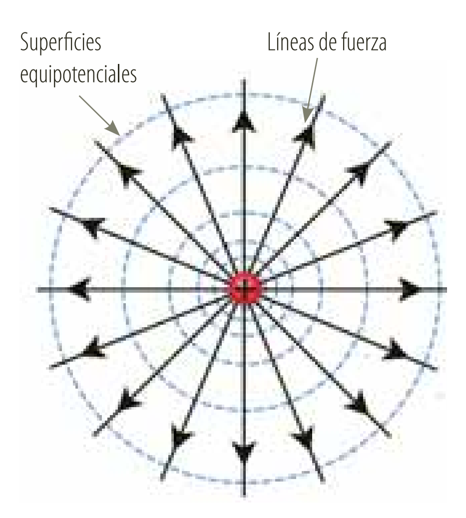


Figura 11. Las superficies equipotenciales esféricas se presentan en campos creados por una sola carga.

El potencial eléctrico es una magnitud escalar, cuyo valor depende de la posición del punto considerado. Por lo tanto, si consideramos dos puntos A y B en un campo eléctrico, sus respectivos potenciales serán:

$$V_A = \frac{E_{p_A}}{q} \quad \text{y} \quad V_B = \frac{E_{pB}}{q}$$

La diferencia de potencial entre los puntos A y B cuyo potencial en cada punto es V_A y V_B respectivamente, se expresa como:

$$\Delta V = V_B - V_A$$

Si una carga positiva se mueve en la dirección del campo eléctrico, quiere decir que la carga pierde energía potencial y siempre se desplaza de un punto de mayor potencial a uno de menor potencial, por lo tanto, se dice que hay una caída o diferencia de potencial. Si una carga se desplaza en dirección opuesta a la del campo eléctrico, significa que la carga se desplaza de un punto de menor potencial a un punto de mayor potencial.

Cuando una misma carga q se desplaza de un potencial a otro, la diferencia de potencial también se puede expresar en términos de la diferencia de la energía potencial ΔE_p, como:

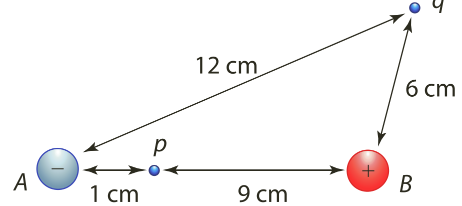
$$\Delta V = \frac{\Delta E_p}{q}$$

Si en un campo eléctrico se unen todos los puntos que se encuentran al mismo potencial, se obtienen superficies equipotenciales. En el campo generado por una sola carga las superficies son esféricas con centro en la carga. En general, las superficies equipotenciales son superficies normales a las líneas de fuerzas (figura 11).

EJEMPLO

Dos cuerpos A y B de dimensiones muy pequeñas tienen cargas eléctricas de $3{,}0 \cdot 10^{-9}$ C y $6{,}0 \cdot 10^{-9}$ respectivamente.

Si A y B se encuentran fijos como se muestra en la figura, determinar el potencial eléctrico creado en el punto p y en q por las cargas.



Solución:

El potencial generado en un punto por la acción simultánea de varias cargas es:

- Para el punto p es: $V_p = V_{p,A} + V_{p,B} = K\frac{Q_A}{r_{A,p}} + K \cdot \frac{Q_B}{r_{B,p}}$

$$V_p = (9 \times 10^9\ \text{N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2)\frac{(3{,}0 \times 10^{-9}\ \text{C})}{(1{,}0 \times 10^{-2}\ \text{m})} + (9 \times 10^9\ \text{N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2)\frac{(6{,}0 \times 10^{-9}\ \text{C})}{(9{,}0 \times 10^{-2}\ \text{m})} = 3.300\ \text{V}$$

- Para el punto q es: $V_q = V_{q,A} + V_{q,B} = K \cdot \frac{Q_A}{r_{A,p}} + K \cdot \frac{Q_B}{r_{B,p}}$

$$V_p = (9 \times 10^9\ \text{N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2)\frac{(3{,}0 \times 10^{-9}\ \text{C})}{(12 \times 10^{-2}\ \text{m})} + (9 \times 10^9\ \text{N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2)\frac{(6{,}0 \times 10^{-9}\ \text{C})}{(6{,}0 \times 10^{-2}\ \text{m})} = 1.125\ \text{V}$$

El potencial eléctrico generado en el punto p es 3.300 V y en el punto q es 1.125 V.

2.3 Campo eléctrico uniforme

Considera dos placas planas paralelas, separadas entre sí una distancia *d*, las cuales se encuentran electrizadas uniformemente con cargas de la misma norma pero de signos contrarios, como se observa en la figura 12.

Si se pone una carga de prueba en un punto situado entre las placas, dicha carga quedará sujeta a la atracción de la fuerza *F*, debido al campo eléctrico originado por las placas en el espacio que existe entre ellas. De tal manera que la carga se desplazará perpendicularmente a la superficie de las placas alejándose de la placa positiva y acercándose a la placa negativa.

Por tanto, concluimos que, el campo eléctrico existente entre estas placas, tiene el mismo valor, la misma dirección y el mismo sentido, en toda la región comprendida entre las placas.

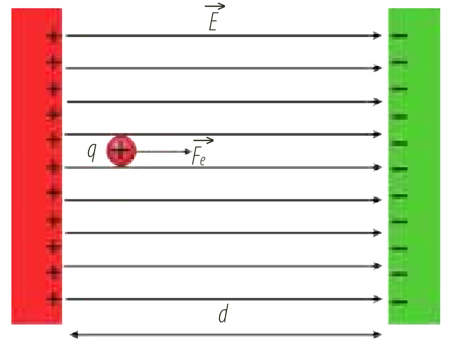


Figura 12. El campo eléctrico generado entre dos placas planas paralelas electrizadas con la misma carga es un campo eléctrico uniforme.

Definición

Un campo eléctrico es uniforme si en cualquier punto del campo su dirección e intensidad es la misma.

El campo eléctrico entre dos placas es uniforme excepto en los extremos de las placas, debido a que en dichos extremos las líneas de fuerza se curvan.

La diferencia de potencial entre las placas se relaciona con la variación de la energía potencial eléctrica y con la carga mediante la expresión:

$$\Delta V = \frac{\Delta E_p}{q}$$

Como la variación de la energía potencial eléctrica es igual al trabajo realizado para llevar la carga q desde la placa negativa hasta la placa positiva, es decir:

$$W = F_e \cdot d$$

En donde la fuerza es igual a:

$$F_e = q \cdot E$$

Por tanto,

$$\Delta V = \frac{W}{q}$$

$$\Delta V = \frac{F_e \cdot d}{q}$$

$$\Delta V = \frac{q \cdot E \cdot d}{q}$$

$$\Delta V = E \cdot d$$

de donde,

$$E = \frac{\Delta V}{d}$$

Como la diferencia de potencial se mide en voltios y la distancia en metros, la unidad para la intensidad del campo eléctrico es voltio sobre metro (V/m).

EJEMPLO

El campo eléctrico generado por dos placas paralelas es $E = 2{,}0 \times 10^4$ N/C, y la distancia entre ellas es $d = 5{,}0$ mm. Si un electrón se deja libre y en reposo, cerca de la placa negativa, determinar:

a. La norma, la dirección y el sentido de la fuerza eléctrica que actúa sobre el electrón, si su valor es $q_e = 1{,}6 \times 10^{-19}$ C

b. La diferencia de potencial entre las placas.

Solución:

a. Como el electrón tiene carga negativa, la fuerza que actúa sobre él tiene la misma dirección, pero sentido contrario al del campo eléctrico, es decir, la fuerza está dirigida de la placa negativa hacia la positiva.

El valor de la fuerza del electrón es:

$Fe = q \cdot E$

$Fe = (1{,}6 \times 10^{-19}\ \text{C})(2{,}0 \times 10^4\ \text{N/C})$

$= 3{,}2 \times 10^{-15}\ \text{N}$

La fuerza eléctrica que actúa sobre el electrón es $3{,}2 \times 10^{-15}$ N

b. La diferencia de potencial entre las placas es:

$\Delta V = E \cdot d$

$\Delta V = (2{,}0 \times 10^4\ \text{N/C})(5 \times 10^{-3}\ \text{m})$

$\Delta V = 1{,}0 \times 10^2\ \text{V}$ *Al calcular*

La diferencia de potencial entre las placas es 100 V.

2.4 Algunas aplicaciones electrostáticas

2.4.1 Blindaje electrostático

Cuando un conductor electrizado se encuentra en equilibrio electrostático, el campo eléctrico es nulo en todos los puntos internos. Si dicho conductor presenta una cavidad interna, las cargas eléctricas se reorganizan rápidamente en la superficie externa del conductor, con el fin de anular el campo eléctrico en todos los puntos internos. De esta manera, en la cavidad del conductor los efectos electrostáticos no se encuentran presentes, debido a la nulidad del campo eléctrico y a la distribución de las cargas eléctricas en la superficie externa del conductor.

Los conductores huecos se emplean para proteger artefactos de los efectos eléctricos; para ello, se encierran dentro de una cubierta metálica, de modo que se produce un **blindaje electrostático**. Experimentalmente, este fenómeno se puede comprobar por medio de la jaula de Faraday.

2.4.2 El generador de Van der Graff

El generador es una máquina electrostática creada por el físico norteamericano Robert Van der Graff en 1930. Este aparato consiste en una banda de caucho que pasa por dos poleas, una de las cuales se encuentra impulsada por un motor que le imprime rotación (figura 13). La otra polea se encuentra ubicada en el interior de una esfera metálica grande y hueca, sostenida por un soporte aislante y cilíndrico. Al moverse, la banda de caucho es electrizada por un conjunto de agujas metálicas parecidas a las de un cepillo, las cuales mantienen un potencial negativo con relación a la tierra. La descarga a través de las puntas suministra continuamente electrones sobre la banda, los cuales se depositan en la esfera. Como la esfera es un conductor hueco, las cargas se distribuyen sobre la superficie exterior de la misma, y se van acumulando hasta alcanzar el valor de la rigidez dieléctrica del aire. El generador de Van der Graff es empleado para acelerar partículas subatómicas en los laboratorios de investigación.

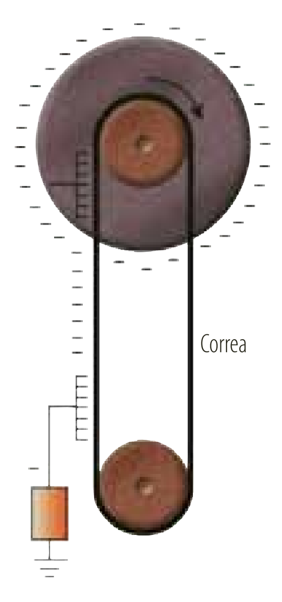


Figura 13. Máquina electrostática de Robert Van der Graff.

El experimento de Millikan

Robert Millikan, (figura 14) en uno de los experimentos más importantes de la física, calculó la carga del electrón al analizar su movimiento dentro de un campo eléctrico constante. Millikan observó, a través de un microscopio, el comportamiento de finas gotas de aceite, introducidas por medio de un atomizador entre un par de placas paralelas, cuya región central iluminó como se observa en la figura. Al salir del atomizador, las gotas se cargaban eléctricamente con la boquilla y alcanzaban una velocidad, cuya medida permitía determinar la masa de cada una de las gotas. Cuando cargó las placas encontró que algunas gotas quedaban suspendidas, lo cual mostraba que estas estaban cargadas negativamente. Con base en estas mediciones, determinó que la carga de cada gota era múltiplo entero del número $1{,}6 \times 10^{-19}$ C, valor correspondiente a la carga de un electrón.



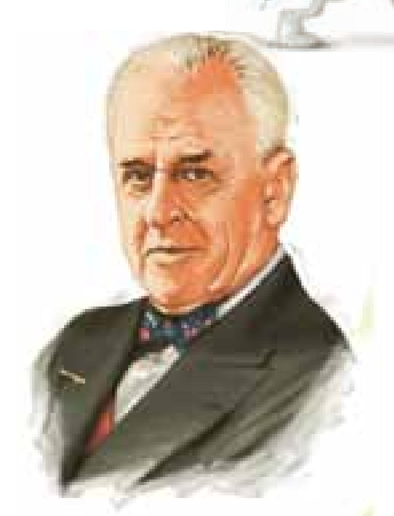


Figura 14. Robert Millikan, físico estadounidense quien determinó el valor de la carga del electrón y ganó el Premio Nobel de Física en 1923.

Capacitancia de un conductor: condensadores

Cuando a un conductor se le proporciona una carga, este adquiere un potencial que es constante en toda su superficie. Al cambiar el valor de su carga, el valor del potencial también varía, lo cual se expresa como:

$$q = C \cdot V$$

Donde C es la constante de proporcionalidad del conductor denominada **capacitancia eléctrica** del conductor, siendo sus unidades en el SI el culombio sobre voltio (C/V). Esta unidad se denomina faradio (F) y es usual expresar la capacitancia eléctrica en microfaradios (μF).

Se puede afirmar que, la capacidad eléctrica de un conductor corresponde a la cantidad de carga que puede almacenar por cada voltio de diferencia de potencial al que se someta.

En 1746, el científico holandés Petrus Van Musschenbroeck logró almacenar carga eléctrica en una botella. Para ello, llenó una vasija con trocitos de cobre, la tapó con un corcho perforado por una aguja que la ponía en contacto con dichos trozos, y tocó una y otra vez la aguja con un vidrio que la electrizaba tras cada toque.

Así logró construir el primer condensador de carga eléctrica al que llamó botella de Leyden. Un condensador es un sistema de dos conductores muy próximos que pueden adquirir cargas iguales y de signo contrario.

Todo condensador tiene dos terminales, los cuales, al ser conectados a una diferencia de potencial, se hallan con capacidad para almacenar carga eléctrica.

Así que el cociente entre la carga q, que es almacenada por el condensador, y la diferencia de potencial V es constante, se expresa como:

$$C = \frac{q}{V}$$

En las telecomunicaciones, los condensadores son usados para la generación y captación de ondas de radio.



Interpreta

Marca con una ✗ la respuesta correcta en las preguntas 1 a 4.

1 **La propiedad que poseen algunos cuerpos de atraer a otros cuerpos después de ser frotados se denomina:**

a. Inducción eléctrica.
b. Carga eléctrica.
c. Fuerza eléctrica.
d. Magnetismo.

2 **Un electroscopio es un dispositivo para:**

a. Transferir constantemente corriente.
b. Distribuir electricidad sobre cualquier objeto.
c. Evidenciar la presencia de cargas eléctricas.
d. Generar carga eléctrica.

3 **En la ley de Coulomb se cumple que:**

a. La fuerza eléctrica es inversamente proporcional a las cargas eléctricas.
b. La fuerza eléctrica es directamente proporcional a la distancia entre las cargas.
c. Cuanto más grandes sean los objetos cargados, mayor es la fuerza eléctrica que se ejerce sobre ellos.
d. La fuerza eléctrica es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre las cargas.

4 **La constante dieléctrica k_d:**

a. Caracteriza si la fuerza es de atracción o repulsión.
b. Determina la energía por unidad de carga que tiene el sistema.
c. Caracteriza el medio material donde se encuentra el campo.
d. Representa el espacio donde hay presencia de cargas eléctricas.

5 **Completa la siguiente tabla:**

Símbolo	Representa	Tipo de magnitud	Unidad en el SI
q	Carga		
E	N/C		
F			
V	Escalar		

Argumenta

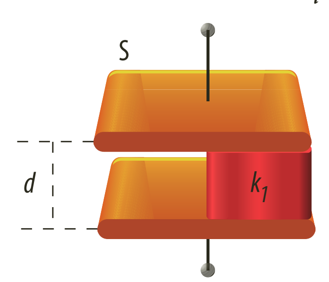
6 **Responde. ¿Qué tipo de carga eléctrica posee un cuerpo que tiene más electrones que protones? ¿Por qué?**

7 **En los vértices de un triángulo equilátero de 4 cm de lado están colocadas tres cargas de $8 \cdot 10^{-8}$ C, respectivamente. Calcula el valor de la fuerza ejercida por las otras dos y describe cómo es su dirección.**

8 **Si al frotar con lana un globo inflado, el globo gana dos millones de electrones, ¿de qué signo es la carga adquirida por la lana y por el globo?**

9 **Responde. ¿Por qué se plantea que la fuerza electrostática que existe entre dos cargas es directamente proporcional al producto de las cargas que interactúan?**

10 **En el diagrama se muestra un condensador con un dieléctrico hasta la mitad de su superficie. Calcula la capacidad equivalente en términos de *S*, *d* y de la constante dieléctrica k_1.**



Propone

11 **Responde. ¿Habrá alguna disposición de cargas que logren crear superficies equipotenciales que se crucen? Propón una solución a la situación planteada.**

12 **Cuando una persona toca a otra persona que estaba cargada de electricidad estática, es posible que esta se descargue hacia el suelo a través de la persona, produciéndole una molesta sensación de contacto eléctrico. Esto no causa gran daño a las personas en pequeñas cantidades.**

a. ¿Por qué es importante evitar la concentración de electricidad estática?
b. ¿En qué tipos de ambientes la electricidad estática constituye un grave peligro?
c. ¿Qué recomendaciones darías para prevenir daños por transferencia de cargas estáticas?

Actividades

Verifica conceptos

1 **Escribe V, si la afirmación es verdadera o F, si es falsa. Justifica tu respuesta.**

- ☐ La electrización consiste en hacer que un objeto pueda atraer a otros después de ser frotados.
- ☐ Un cuerpo está cargado positivamente cuando tiene un exceso de electrones.
- ☐ Cuando se encuentran dos cargas de diferente signo, una cerca a la otra, se dice que hay una interacción de atracción.
- ☐ En un sistema aislado, la carga eléctrica no se crea ni se destruye, solo se transfiere de un cuerpo a otro.
- ☐ Un material aislante es aquel que permite el paso de electrones sobre él.
- ☐ Las fuerzas eléctricas aparecen sobre cada una de las cargas que interactúan y son de igual magnitud e igual línea de acción, pero en sentidos opuestos.
- ☐ La constante electrostática K no varía en ningún medio donde hay presencia de cargas eléctricas.

2 **Escribe una lista indicando algunos fenómenos relacionados con las cargas eléctricas.**

3 **Clasifica los materiales como conductores o aislantes.**

a. Agua.
b. Aire.
c. Plástico.
d. Aluminio.
e. Cobre
f. Plata.
g. Vidrio.
h. Cartón.
i. Mármol.
j. Oro

Selecciona la opción correcta en los ejercicios 4 a 7.

4 **Un cuerpo se carga positivamente:**

a. Al agregarle protones.
b. Al quitarle protones.
c. Al agregarle electrones.
d. Al quitarle electrones.

5 **Responde. ¿Cuál de las partículas que componen el átomo tiene menor masa?**

a. El electrón.
b. El neutrón.
c. El protón.
d. El núcleo.

6 **El científico que inventó la balanza de torsión es:**

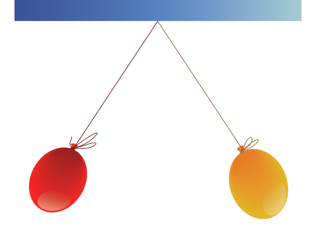
a. Michael Faraday.
b. Charles Coulomb.
c. Charles du Fay.
d. William Gilbert.

7 **Una carga eléctrica positiva se obtiene al frotar:**

a. Vidrio y vidrio.
b. Vidrio y seda.
c. Vidrio y metal.
d. Seda y metal.

Analiza y resuelve

8 **Llegas tarde a una feria de ciencias y observas dos globos colgados que están separados y que luego se juntan solos, como lo muestra la figura.**

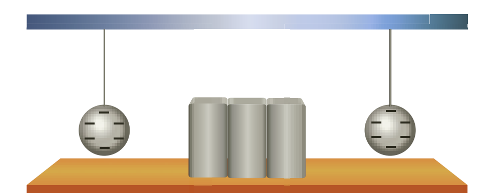



a. ¿Por qué al inicio los globos estaban separados?
b. ¿Por qué después de un tiempo se juntan?
c. ¿Cómo harías para que los globos se vuelvan a separar?

9 **Si se observa que un objeto A suspendido es atraído hacia un objeto B que tiene carga:**

a. ¿Podemos deducir que el objeto A está cargado? Explica tu respuesta.
b. ¿Qué podrías hacer para saber si A está cargado?

10 **Sobre una tabla de madera se colocan tres bloques de metal en contacto, como se muestra en la figura, y a cada lado se pone una esfera cargada negativamente. Los tres bloques son separados mediante una varilla aislante y se retiran las dos esferas cargadas. Explica cómo quedan cargados los bloques.**



Actividades

Problemas básicos

11 **Dos esferas se atraen con una fuerza determinada.**

a. ¿Cómo se ve afectado el valor de la fuerza si triplicamos el valor de la carga de cada esfera?

b. ¿Qué sucede si se reduce a la tercera parte?

12 **Calcula la carga supuesta que deberían tener la Tierra y la Luna para que la fuerza de repulsión eléctrica entre ellas igualara la fuerza gravitatoria. Datos: $M_T = 6 \times 10^{24}$ kg; $M_L = 7{,}4 \times 10^{22}$ kg; $d_{T-L} = 384.400$ km.**

13 **Calcula las fuerzas que ejercen una carga de 5 μC sobre otras dos cargas de 2 C y 1 C situadas a 3 m.**

14 **Un cuerpo de masa 0,5 kg y de carga 0,5 C se encuentran a 2 m de otro cuerpo de masa 1,5 kg y carga 1,5 C. Determina si se atraen o se repelen y calcula la fuerza electrostática.**

15 **Una barra de vidrio A inicialmente neutra es frotada con seda y pierde 10×10^{12} electrones; otra barra de vidrio idéntica B, también es frotada y pierde 30×10^{12} electrones. Si ambas barras se ponen en contacto y después de la transferencia de electrones quedan cargadas con igual cantidad de carga, ¿cuál es el déficit de electrones después del contacto en cada barra?**

16 **Un electroscopio está cargado negativamente con un exceso de 20×10^{12} electrones; otro electroscopio idéntico ha sido cargado positivamente y tiene un déficit de 12×10^{12} electrones. Si los electroscopios se ponen en contacto, ¿cuántos electrones se transfieren?**

17 **Responde. ¿Cuál de las siguientes cargas electrostáticas no concuerdan con la realidad? Considera $q_1 = 2{,}4 \cdot 10^{-19}$ C y $q_2 = 11{,}2 \cdot 10^{-19}$ C.**

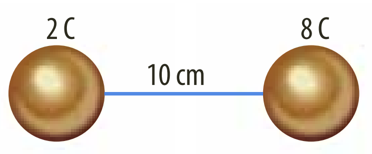
18 **Determina cuántos electrones ($q_e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C) ha perdido o ganado un cuerpo que posee una carga de:**

a. $q_1 = 2$ nC

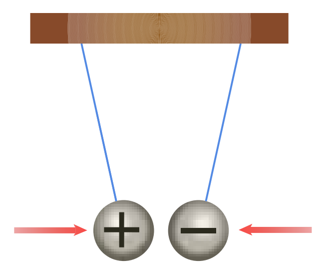
b. $q_2 = -1$ nC

19 **Dos cargas de 40 mC se repelen con fuerzas de 360 N. Calcula la distancia que las separa.**

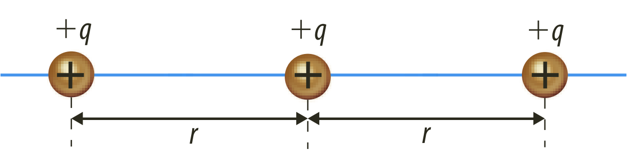
20 **Se tienen dos cargas de 2 C y 8 C separadas por una distancia de 10 cm como muestra la figura. Calcula la fuerza en N que existe entre ellas.**



21 **Se tienen dos cargas de 20 C y −30 C como se observa en la imagen. ¿Cuál es la fuerza de atracción entre ellas si la distancia inicial entre los péndulos es de 1 cm?**

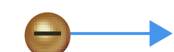


22 **Se dispone un sistema de cargas eléctricas positivas, puntuales, del mismo valor y alineadas tal como lo indica la figura. Calcula la fuerza neta que actúa sobre la carga que se encuentra en la mitad.**



23 **Si la fuerza de repulsión entre dos cargas es 18×10^{13} N, calcula la distancia que las separa siendo $q_1 = -8$ C y $q_2 = -4$ C.**

24 **Se tienen dos cargas iguales separadas 3 cm de distancia y que experimentan una fuerza de 360 N como se muestra en la figura. ¿Cuál es el valor de las cargas si ambas son iguales?**

 F = 360 N 

25 **Dos cargas, de igual magnitud, se atraen con una fuerza de 40 N cuando se separan 10 cm. ¿Cuál es la diferencia de la fuerza entre las cargas cuando la distancia entre ellas es 70 cm?**

26 **Responde. ¿Cuál de las siguientes situaciones da como resultado una mayor fuerza? ¿Por qué?**

a. La fuerza de repulsión que ejerce una carga de 100 C sobre una de 1 C.

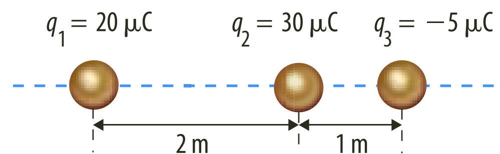
b. La fuerza de repulsión que ejerce una carga de 1 C sobre una carga de 100 C.



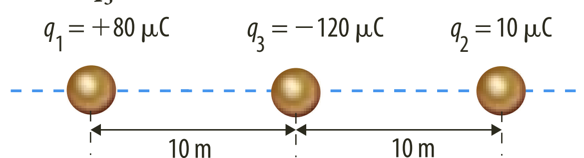


Problemas de profundización

27 **Tres cargas eléctricas se hallan dispuestas como muestra la figura. Encuentra el valor de la fuerza ejercida por las cargas q_1 y q_2 sobre la carga q_3.**



28 **Se tiene q_1, q_2 y q_3 con cargas de 80 μC, 10 μC y −120 μC, respectivamente, dispuestas como se muestra en la figura. Encuentra el valor de la fuerza resultante que las cargas q_1 y q_2 ejercen sobre q_3.**



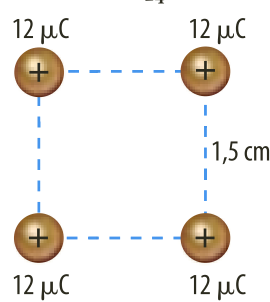
29 **Una carga q_1 está localizada en $x = 0$ m, $y = 0$ m y otra carga q_2 está localizada en $x = 4$ cm, $y = 0$ m. La fuerza que actúa sobre una carga de $2 \cdot 10^{-6}$ C en $x = 8$ cm es de 19,7 N, apuntando en la dirección x negativa. Cuando esta carga de $2 \cdot 10^{-6}$ C se sitúa en $x = 17{,}75$ cm, $y = 0$ m, la fuerza que actúa sobre ella es nula. Determina el valor de las cargas q_1 y q_2.**

30 **Dos partículas de 10 g se encuentran suspendidas verticalmente por dos hilos de 30 cm desde un mismo punto. Si se les suministra a ambas partículas la misma carga, se separan de modo que los hilos forman entre sí un ángulo de 60°.**

a. Dibuja un diagrama de las fuerzas que actúan sobre las partículas.

b. Calcula el valor de la carga que se suministra a cada partícula.

31 **Cuatro cargas están localizadas en los vértices de un cuadrado como se muestra en la figura. Encuentra la magnitud y la dirección de la fuerza resultante sobre q_4.**

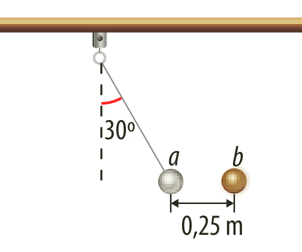


32 **Dos partículas, *a* y *b*, tienen masas iguales de 1,6 g y cargas de igual valor, pero de signos contrarios. La partícula b está fija en el espacio y la partícula *a* está colgada del techo por un hilo de masa despreciable como se muestra en la figura. Cuando ambas partículas están separadas una distancia de 0,25 m, la partícula *a* se halla en equilibrio y el hilo forma un ángulo de 30° con la vertical. Calcula:**

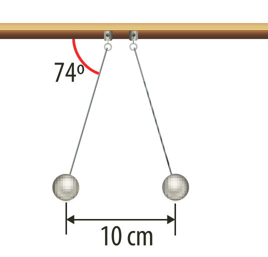
a. La tensión del hilo.

b. La fuerza de atracción entre las partículas.

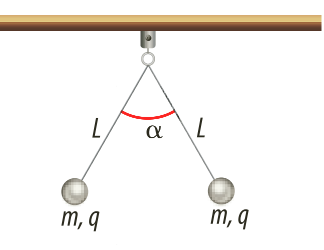
c. El valor absoluto de la carga de las partículas.



33 **En el sistema, las cargas de 4,2 g están en equilibrio. Si las esferas están cargadas con la misma cantidad, determina la carga de cada una.**



34 **Dos esferas pequeñas, de masa m = 5 g y con carga q, cada una, se suspenden del mismo punto mediante hilos iguales, de masa despreciable y longitud L = 0,5 m, en presencia del campo gravitatorio terrestre. ¿Cuál debe ser el valor de la carga q para que, en equilibrio, los hilos formen un ángulo α = 60°?**



35 **Se dispone de un sistema en donde dos electrones se encuentran fijos a una distancia de 25 cm, ¿qué aceleración experimentará uno de ellos cuando se libera?**



Actividades

Verifica conceptos

1 **Escribe V, si la afirmación es verdadera o F, si es falsa. Justifica tu respuesta.**

- ☐ La dirección del campo eléctrico coincide con la fuerza que actúa sobre la carga de prueba.
- ☐ La unidad de intensidad del campo eléctrico es V/C.
- ☐ Por un punto del espacio el vector campo eléctrico es tangente a la línea de fuerza que pasa por ahí.
- ☐ Cuando es menor la carga eléctrica, mayor es la energía potencial asociada a esa carga.
- ☐ Una superficie equipotencial contiene un conjunto de puntos al mismo potencial.
- ☐ El campo eléctrico en el interior de un conductor es igual al que hay en la superficie.
- ☐ El campo eléctrico en el interior de un conductor es igual a cero.

2 **El trabajo requerido para mover una carga de un lugar a otro dividido entre el valor de la carga se llama:**

a. Campo eléctrico.
b. Fuerza eléctrica.
c. Potencial eléctrico.
d. Carga eléctrica.

3 **Completa cada uno de los enunciados.**

a. Las líneas de fuerza son líneas que se usan para representar ____________ un ____________ campo eléctrico.

b. La intensidad de un campo eléctrico es el cociente entre la ____________ que el campo ejerce sobre una ____________ de prueba ubicada en ese punto y el valor de dicha carga.

c. El campo eléctrico es uniforme si en cualquier punto del campo su ____________ e ____________ es la misma.

d. El generador de Van der Graff es una máquina ____________ la cual tiene dos ____________ que son impulsadas por un ____________ que genera una rotación.

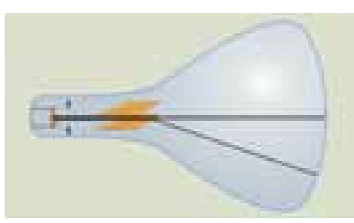
Analiza y resuelve

4 **En algunas recomendaciones del uso adecuado de los electrodomésticos se indica que no se deben colocar juntos varios aparatos eléctricos porque pueden generar un mal funcionamiento en un futuro. Esto se debe a que se generan campos eléctricos que pueden afectar estos artículos. Explica cómo puedes verificar si alrededor de un televisor hay un campo eléctrico.**

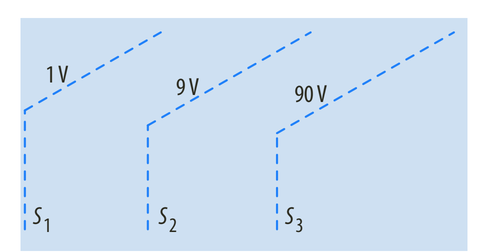
5 **Si una carga puntual produce, a una cierta distancia *r*, un potencial eléctrico de 10 V y un campo eléctrico de módulo *E*, ¿cuánto vale el potencial eléctrico en otro punto donde el campo eléctrico es *E*/4?**

6 **En una región del espacio el campo eléctrico es nulo. ¿Debe ser nulo también el potencial eléctrico en dicha región? Explica tu respuesta.**

7 **En el extremo de un tubo de vidrio se genera un haz de electrones que ilumina una pantalla fluorescente ubicada en el otro extremo. Inicialmente el rayo produce un punto luminoso en el centro de la pantalla. Si el haz pasa por el espacio entre dos placas paralelas, se desvía hacia abajo. ¿Cuál es el signo de la carga de cada placa?**



8 **Si se coloca un electrón en la superficie equipotencial S_2 como se observa en la figura, explica hacia qué superficie se moverá el electrón. Si se coloca un protón, ¿ocurre lo mismo? Explica tu respuesta.**



9 **Una gota de aceite de 0,3 g de masa posee una carga de 3 C. Al introducir la gota en medio de dos placas paralelas que se encuentran en posición horizontal y distan entre sí 5 mm, se observa que la gota permanece en equilibrio. Calcula el campo eléctrico dentro de las placas.**



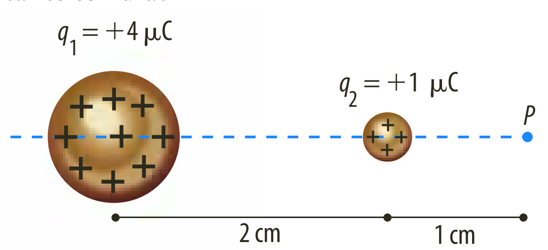
Problemas básicos

10 **Calcula la fuerza que experimenta una carga de −5 μC en un campo eléctrico de 200 N/C.**

11 **Dos cargas $q_1 = 6 \cdot 10^{-6}$ C y $q_2 = 28 \cdot 10^{-6}$ C están separadas 6 m. Halla la intensidad del campo eléctrico.**

12 **Determina el campo eléctrico generado por una carga de $1 \cdot 10^{-6}$ C a 80 cm de ella.**

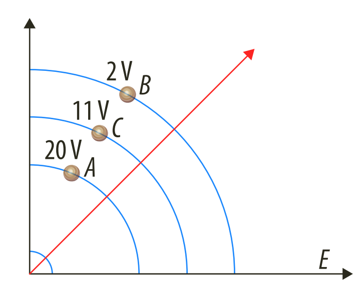
13 **En la figura, ¿en qué punto con respecto a la carga de 1 μC la intensidad del campo resultante es nula?**



14 **Calcula el módulo, la dirección y el sentido del campo eléctrico en los puntos P_1 y P_2 generado por la partícula de carga $q = 9 \cdot 10^{-7}$ C.**

15 **En los vértices de un cuadrado cuya diagonal es 2*d*, se colocan cuatro cargas positivas *q*. ¿Cuál es la intensidad del campo eléctrico en N/C en el centro del cuadrado?**

16 **Calcula la cantidad de energía utilizada por el campo para mover una carga de 2 μC del punto *A* al punto *C* de acuerdo con la siguiente figura.**



17 **El potencial eléctrico a cierta distancia de una carga puntual es de 1.600 V y el valor de la intensidad del campo eléctrico es 800 N/C. ¿Cuál es la distancia a la carga puntual?**

18 **Determina el potencial eléctrico si se tienen dos cargas iguales de $2 \cdot 10^{-6}$ C y si la fuerza electrostática entre ellas es de 0,4 N.**

19 **Calcula la diferencia de potencial ($V_1 - V_2$) entre los puntos 1 y 2 del campo eléctrico homogéneo de intensidad $E = 9$ N/C.**

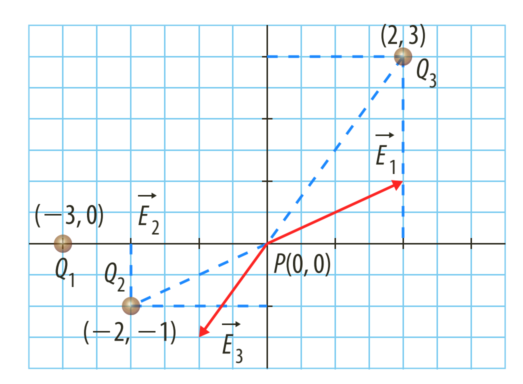


Problemas de profundización

20 **Calcula el valor del campo electrostático en el punto *P*, de coordenadas (0, 0), si se sabe que:**

- $q_1 = 0{,}5$ C y se encuentra en el punto (−2, −1).
- $q_2 = 22$ C y se encuentra en el punto (−3, 0).
- $q_3 = 3$ C y se encuentra en el punto (2, 3).

Las coordenadas de miden en metros.

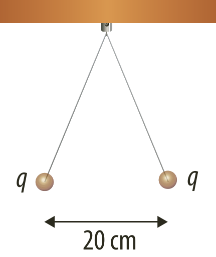


21 **Colgamos del techo dos hilos de 50 cm de longitud. Cada hilo lleva en su extremo una carga positiva de valor $q = 1{,}2 \cdot 10^{-8}$ C. Cuando se llega al equilibrio, las cargas están separadas por una distancia de 20 cm, tal como se muestra en la figura. Calcula:**

a. La tensión de las cuerdas.

b. El potencial eléctrico que crean en el punto medio del segmento que va de una carga a la otra.

c. El campo eléctrico que crean en el punto de unión de los dos hilos con el techo.



22 **Dos esferas conductoras aisladas de 12 y 20 cm de radio, se encuentran en una zona del espacio vacío y con sus centros separados 10 m, y están cargadas cada una con una carga de $25 \cdot 10^{-9}$ C. Las cargas se ponen en contacto mediante un hilo conductor y alcanza una situación de equilibrio. Calcula el potencial al que se encuentra cada una de las esferas antes de ponerlas en contacto.**

Carga eléctrica

Todas las personas han experimentado lo que ocurre cuando se quitan una prenda de tela sintética. Mientras se retira la prenda, se escuchan algunos ruidos y al acercar la cabeza puede erizar el cabello. La anterior observación permite afirmar que algunos materiales, al ser frotados, se electrizan. En la siguiente práctica de laboratorio se pretende comprobar la existencia de dos tipos de carga eléctrica.

Conocimientos previos

Fuerzas que actúan sobre cargas eléctricas y la electrización.

Materiales

- Una hoja de papel periódico
- Una regla plástica de 30 cm
- Un soporte universal con anillo metálico
- Cinta adhesiva
- Una bolsa de plástico
- Una botella de vidrio
- Un trozo de tubo PVC
- Una pluma
- Un trozo de cartón
- Un trozo de madera
- Un trozo de tejido de lana

Procedimiento

1. Corta una tira de 5 cm de ancho a lo largo del papel periódico. Dóblala por la mitad y cuélgala de la regla de 30 cm. Fija la regla en el soporte universal con anillo (utiliza la cinta adhesiva). De esta manera has construido un electroscopio.
2. Extiende la tira de papel periódico sobre la mesa de madera o una cubierta de vidrio, frótala con la bolsa de plástico varias veces, sin hacer mucha fuerza para no romperla.
3. Toma la tira de una orilla, solo con los dedos, y cuélgala de nuevo en la regla.
4. Frota la botella de vidrio con la bolsa de plástico y colócala entre las dos láminas conductoras del electroscopio. Observa y registra el comportamiento del electroscopio. Si las hojas se cierran cuando pasa el objeto, entonces, la carga del objeto es diferente a la que hay en las láminas del electroscopio. Si las láminas se alejan, la carga eléctrica del objeto y la del electroscopio son del mismo tipo.
5. Repite los pasos 2, 3, 4 con los otros objetos. Después, frótalos con el tejido de lana y acércalos a las láminas del electroscopio.
6. Escribe en la tabla de registro el comportamiento de las láminas del electroscopio al ser acercados los diferentes objetos.



Tabla de registro

Cuerpos frotados con la bolsa plástica	Comportamiento con el electroscopio	Cuerpos frotados con el tejido de lana	Comportamiento con el electroscopio
Botella de vidrio		Botella de vidrio	
PVC		PVC	
Pluma		Pluma	
Cartón		Cartón	
Madera		Madera	

Análisis de resultados

1. Describe las características de los objetos que pueden almacenar una carga eléctrica neta.
2. Explica qué ocurriría si pasaras un objeto metálico cargado entre las láminas del electroscopio y si se puede depositar una carga eléctrica neta en ellos.

Potencial eléctrico

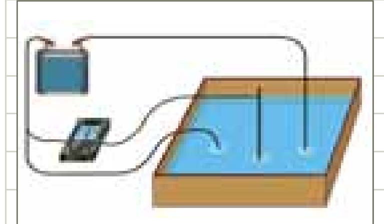
A la carga eléctrica dentro de un campo eléctrico, se le asigna energía potencial eléctrica, la cual depende del potencial eléctrico en dicho punto. Los puntos que se encuentran al mismo potencial dentro de un campo eléctrico determinan superficies equipotenciales. En la siguiente práctica de laboratorio se pretende determinar las superficies equipotenciales debidas de algunas configuraciones de carga eléctrica.

Conocimientos previos

Campo eléctrico, líneas de fuerza y potencial eléctrico.

Materiales

- Cubeta
- Agua
- Sal
- Dos cables conductores
- Fuente de corriente directa, puede ser una pila
- Baldosa o lámina de plástico no lisa
- Voltímetro
- Cinta adhesiva
- Dos placas planas metálicas



Procedimiento

1. Coloca en el fondo de la cubeta una superficie áspera para marcar en ella (con lápiz) unos puntos. Para ello, utiliza la superficie no pulida de la baldosa o la lámina de plástico.
2. Llena la cubeta con solución salina hasta una profundidad aproximada de 1 cm.
3. Conecta a cada polo de la fuente un cable conductor diferente por uno de los extremos, el otro extremo de cada cable sumérgelo en la solución, de esta manera tendrás en la solución dos puntos, uno positivo y otro negativo, con la diferencia de potencial. Colócalos lo más retirados que sea posible.
4. Conecta el terminal negativo del voltímetro al polo negativo de la fuente y fija con cinta el otro terminal del voltímetro a una mina de lápiz (el grafito es un material conductor). Introduce el extremo de la mina de lápiz en la solución, cerca del punto positivo.
5. Lee en la escala del voltímetro la medida del potencial eléctrico en el punto en el que sumergiste el extremo de la mina. En los alrededores del punto positivo localiza puntos que se encuentren al mismo potencial. Marca estos puntos sobre la superficie colocada en el fondo. Traza una línea equipotencial. Traza otras líneas equipotenciales y con base en estas líneas indica la dirección de las líneas de fuerza generadas por el extremo positivo.
6. Limpia la superficie del fondo de la cubeta, para a trazar las líneas equipotenciales debidas a una superficie diferente. Conecta ahora a cada uno de los terminales una placa metálica e introdúcelas en la solución, de tal manera que queden paralelas, ahora no se necesita que queden tan retiradas una de la otra, como lo hiciste con los extremos de la parte anterior. Ten presente cuál es la placa negativa y cuál la positiva.
7. Mide la diferencia de potencial entre las placas. Busca, con el terminal de grafito, puntos en la solución que se encuentren al mismo potencial. Marca estos puntos en la superficie que has colocado en el fondo de la cubeta.

Análisis de resultados

1. Describe el diagrama de las superficies equipotenciales en las dos configuraciones utilizadas.
2. Describe el diagrama de las líneas de fuerza en las dos configuraciones utilizadas.
3. ¿En qué puntos de la región comprendida entre las dos placas encuentras que es mayor la diferencia de potencial con respecto a la placa negativa?



Desfibrilador cardioversor implantable (DCI)

El desfibrilador cardioversor implantable es un aparato electrónico que al estar conectado al corazón permite monitorear constantemente su correcto funcionamiento. Tiene la capacidad de detectar irregularidades en el ritmo del corazón y también aplica desde el interior del cuerpo una energía electrostática suficiente para que el corazón deje de contraer sus fibras de forma incontrolada y hacerle recuperar su ritmo cardiaco normal.

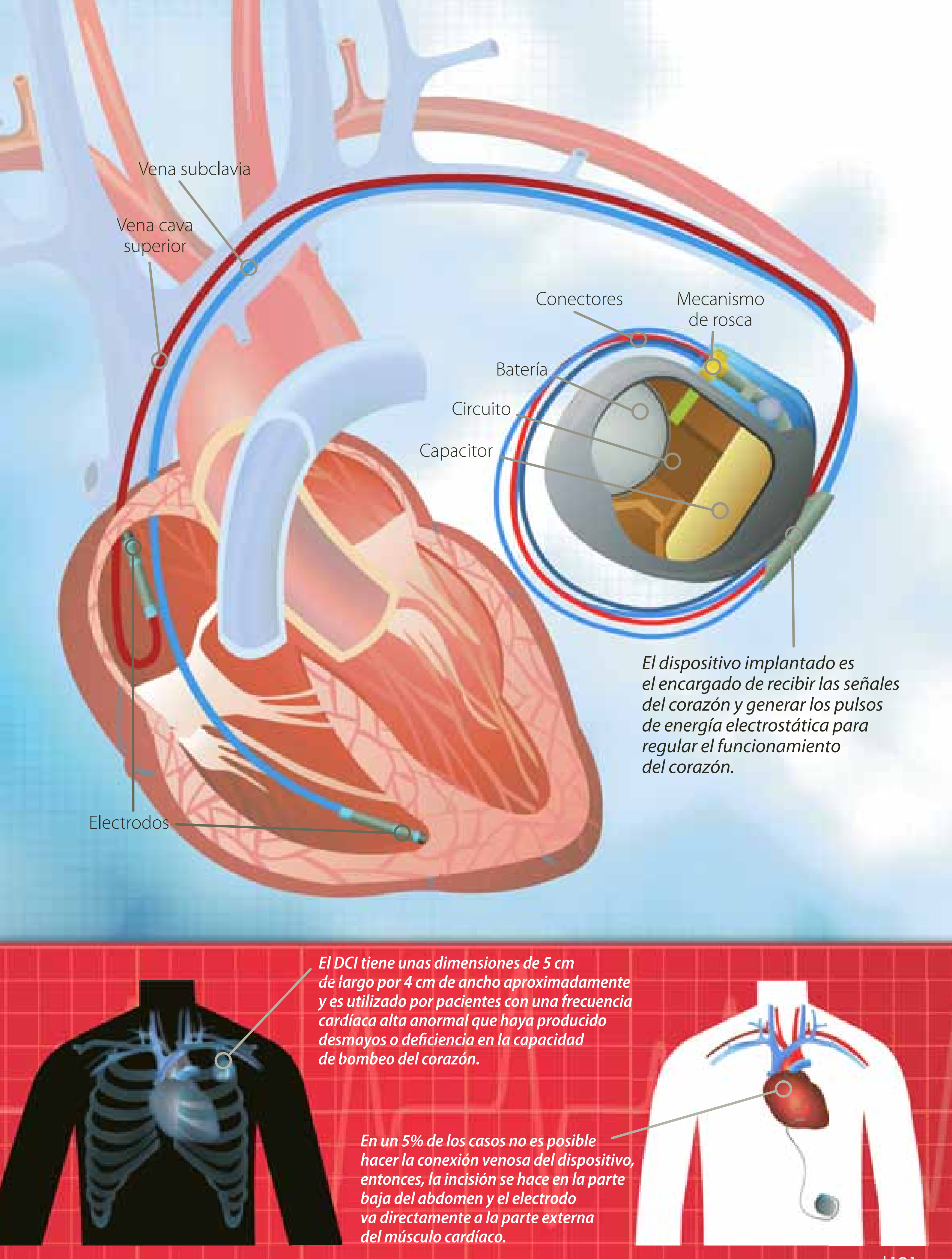


El electrodo es conectado al corazón en su ventrículo derecho o aurícula derecha. En ocasiones se conectan hasta dos electrodos de acuerdo con las necesidades.

En la mayoría de los casos se hace una incisión en la parte inferior de la clavícula izquierda del paciente para implantar el dispositivo.

Los electrodos monitorean la frecuencia cardíaca y se encargan de transmitir los impulsos eléctricos al corazón.

Extremo del electrodo en el ventrículo derecho del corazón.



Vena subclavia
Vena cava superior
Conectores
Mecanismo de rosca
Batería
Circuito
Capacitor
Electrodos
El dispositivo implantado es el encargado de recibir las señales del corazón y generar los pulsos de energía electrostática para regular el funcionamiento del corazón.
El DCI tiene unas dimensiones de 5 cm de largo por 4 cm de ancho aproximadamente y es utilizado por pacientes con una frecuencia cardíaca alta anormal que haya producido desmayos o deficiencia en la capacidad de bombeo del corazón.
En un 5% de los casos no es posible hacer la conexión venosa del dispositivo, entonces, la incisión se hace en la parte baja del abdomen y el electrodo va directamente a la parte externa del músculo cardíaco.



Cargas eléctricas en movimiento

Temas de la unidad

1. Corriente eléctrica
2. Circuitos eléctricos



Para pensar…

¿Te has imaginado alguna vez cómo sería la vida si no existiera la electricidad?

Lo más seguro es que en la mañana no tendrías agua caliente al ducharte, te desplazarías al colegio caminando, en bicicleta o en vehículos de tracción animal.

No existiría la luz, la televisión, los computadores y ni idea de los videojuegos ni de los sistemas portátiles de audio. Es decir, que nuestro diario vivir retrocedería en más de 200 años.

La energía eléctrica es una pieza clave en este mundo actual, cuyo desarrollo depende de la tecnología, y esta no sería posible sin la electricidad que forma parte activa de nuestra vida y de nuestra historia.

Por tal razón, en esta unidad estudiaremos las características de las cargas en movimiento y el comportamiento de estas en los circuitos eléctricos.

Para responder…

- ¿Cómo se genera y se suministra energía eléctrica a una ciudad?
- ¿Qué elementos de un circuito eléctrico conoces?

1. Corriente eléctrica

1.1 La corriente eléctrica

Durante muchos siglos, el hombre utilizó el fuego con el propósito de lograr iluminación durante las noches. Comparados con ellos, en la actualidad, vivimos en un nuevo mundo prácticamente mágico, en donde con sólo oprimir un botón cambia por completo nuestro modo de vida y la manera de percibir los objetos que se encuentran a nuestro alrededor.

Diversos experimentos han demostrado que la electricidad puede transferirse de un cuerpo a otro. El más famoso de estos experimentos fue el realizado por el holandés Musschenbroek, en la ciudad de Leyden, y que se conoce con el nombre de "botella de Leyden". Musschenbroek introdujo en el interior de una botella metálica, una aguja cuyo extremo superior terminaba en una esfera, y comenzó a electrizarla por frotamiento. Tras este proceso, tocó con su mano la esfera y sintió una enorme descarga.

Por otra parte, en la Antigüedad se pensaba que la electricidad era el resultado de dos fluidos distintos, uno positivo y otro negativo. Sin embargo, Benjamín Franklin propuso la teoría de la electricidad basada en un solo fluido, tenue y sin peso; el cual al presentarse en un cuerpo con cierto exceso generaba una electricidad positiva y al existir un déficit de este generaba una electricidad negativa. Por tal razón, se creía que lo que se movía eran las cargas positivas, aunque en la actualidad se conoce que son las cargas negativas, los electrones, las que se desplazan a través de un conductor dando lugar a determinado flujo, denominado corriente eléctrica.

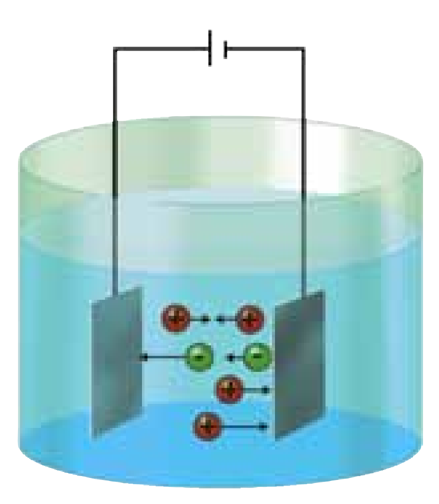


Figura 1. Un conductor líquido o un gas iónico permite el movimiento de iones positivos y de iones negativos.

Definición

La corriente eléctrica es el movimiento continuo y ordenado de cargas eléctricas de un lugar a otro.

Pero ¿cómo es que llega la electricidad a nuestros aparatos eléctricos? En el interior de un conductor eléctrico, por ejemplo un cable, se encuentran millones de átomos con electrones libres vibrando. Si este cable se encuentra conectado a las terminales de una fuente, como una pila, sus electrones libres reciben la energía almacenada de la pila y empiezan a moverse de una manera ordenada a través del conductor. El sentido correspondiente al flujo de los electrones obedece a la ley de los signos, ya que son repelidos por el terminal negativo de la pila y atraídos por el terminal positivo.

De esta manera, la corriente eléctrica que circula por los cables no es más que un movimiento de cargas eléctricas (en este caso los electrones del metal que forma el interior del cable) desde el enchufe hasta el aparato eléctrico.

En los conductores sólidos, como los metales, son los electrones externos al átomo los que se mueven con libertad, pero en los conductores líquidos iónicos o gases iónicos (agua salada, ion de oxígeno), se pueden mover tanto iones positivos como iones negativos (figura 1). Los materiales que no son conductores, no permiten el flujo de la corriente eléctrica y se denominan aislantes o dieléctricos.



1.1.1 Efectos que produce la corriente eléctrica

La corriente eléctrica produce efectos en los materiales por los cuales circula la carga y en el entorno del cuerpo por el cual fluye. Entre los efectos más relevantes que produce la corriente eléctrica se encuentran:

- *Generación de calor,* por ejemplo, una plancha eléctrica.
- *Efectos químicos,* por ejemplo, la electrólisis.
- *Magnetismo,* por ejemplo, los electroimanes.

Desde un punto de vista energético, se pueden interpretar los efectos que la corriente eléctrica produce, ya que el movimiento de cargas implica transporte de energía hacia algún lugar en el cual ocurrirá la transformación de la energía hacia otras formas de energía, como la mecánica, la cinética, la calórica, etc.

HERRAMIENTA MATEMÁTICA

$$1\ A = 1\frac{C}{s}$$

$$1\ \mu A = 10^{-6}\ A$$

1.1.2 Intensidad de corriente eléctrica

Para determinar la intensidad de la corriente imagina que te encuentras observando una competencia atlética, por ejemplo una maratón, sería posible calcular la intensidad de la corriente atlética si contamos el número de atletas que pasan por la línea visual durante un intervalo de tiempo. Si comparamos esta competencia con un conductor, en donde los atletas son los electrones libres, entonces podríamos definir la intensidad de corriente eléctrica.

Definición

La intensidad de la corriente eléctrica (i) es la cantidad de carga neta (q) que circula por una sección transversal de un conductor en un intervalo de tiempo (t).

La intensidad de corriente eléctrica se puede escribir como:

$$i = \frac{q}{t}$$

La unidad de la intensidad de corriente es el ampere o amperio, que se simboliza con la letra A. Un amperio corresponde al paso de la carga de un culombio a través de la sección transversal de un conductor durante un segundo. Para muchos casos el amperio resulta ser una unidad muy grande, por lo cual es habitual usar el microamperio (μA).

EJEMPLO

Calcular la cantidad de electrones que atraviesan la sección transversal de un conductor en un minuto, si la intensidad de corriente es de 4 A.

Solución:

Para calcular la cantidad de electrones es necesario determinar la carga que circula por la sección transversal. Por tanto, tenemos que:

$$i = \frac{q}{t}$$

$q = i \cdot t$ *Al despejar q*

$q = 4\ A \cdot 60\ s$ *Al remplazar*

$q = 240\ C$ *Al calcular*

Como la carga de un electrón es $1{,}6 \times 10^{-19}$ C, tenemos que la cantidad de electrones existentes en una carga de 240 C es igual a $1{,}5 \times 10^{21}$.



Figura 2. La pila eléctrica de Alessandro Volta, es la primera fuente de corriente eléctrica sin interrupción.

1.2 Fuentes de voltaje

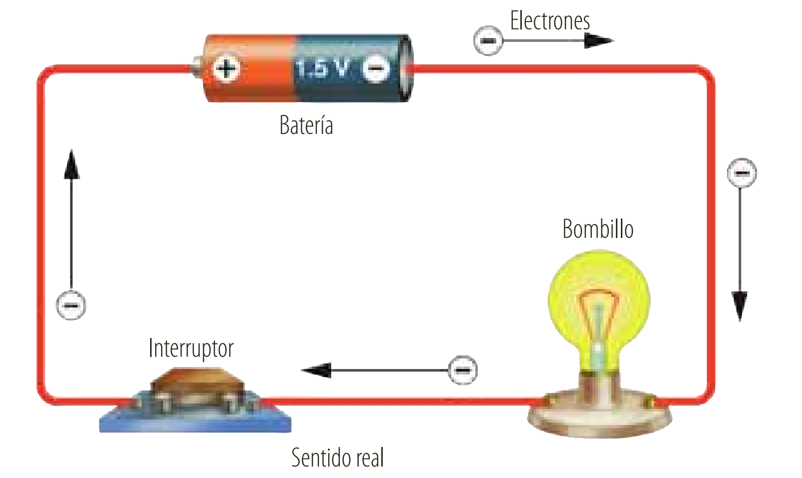
Para mantener constante una corriente eléctrica, es necesaria una "bomba eléctrica" que mantenga la diferencia de potencial, así como una bomba de agua mantiene la diferencia de nivel para que el agua fluya. Todo dispositivo que genera una diferencia de potencial se conoce como **fuente de voltaje**.

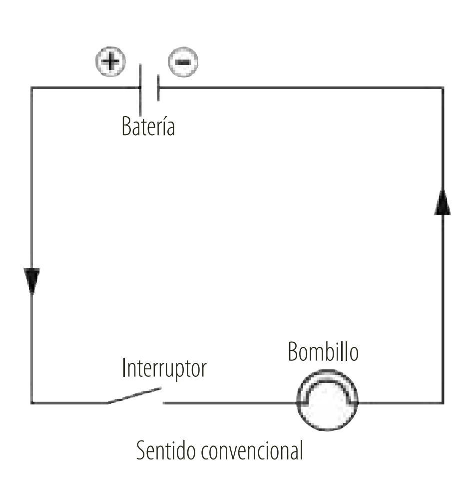
Antiguamente, la corriente se producía por medio de las máquinas electrostáticas. Posteriormente, se generaba por almacenamiento, como en el caso de la botella de Leyden. Pero solo hasta el siglo XIX Alessandro Volta inventó la batería eléctrica, que permitía suministrar, por primera vez, corriente eléctrica sin interrupción. La pila voltaica estaba compuesta por pequeños discos de plata, cinc y cartón impregnado de una solución salina, intercalados en orden (figura 2).

1.2.1 Sentido de la corriente

Cuando las dos terminales de una pila se conectan directamente a un conductor, como un alambre, la corriente eléctrica supone el desplazamiento de los electrones desde los puntos de menor potencial hasta los de mayor potencial. En el caso de una pila, los llamados polos negativo (−) y positivo (+) representan puntos de menor y mayor potencial, respectivamente; por lo cual el sentido del movimiento de los electrones en el conductor se encuentra dado desde el polo negativo hacia el polo positivo.

Durante muchos años, se planteó la idea de que las cargas eléctricas que se movían en los conductores eran las de tipo positivo (+) y, en consecuencia, el sentido de la corriente sería el correspondiente al de las cargas positivas. Este convenio se ha mantenido y por tanto el sentido convencional de la corriente eléctrica es desde los puntos de mayor potencial a los puntos de menor potencial, como se observa en la conexión realizada en la siguiente figura.





1.2.2 Fuerza electromotriz

Para poder establecer y mantener una corriente eléctrica en un conductor, es necesaria la intervención de un dispositivo denominado generador eléctrico.

Este generador eléctrico no carga sino que separa continuamente cargas positivas y negativas ya existentes, que se acumulan en sus terminales. Esto produce una diferencia de potencial eléctrico entre ellos, que se conoce como voltaje, tensión o fuerza electromotriz (fem).

EJERCICIO

¿Cuál es la intensidad de corriente que pasa por la sección transversal de un alambre, cuando 10 C lo atraviesan en 20 s?

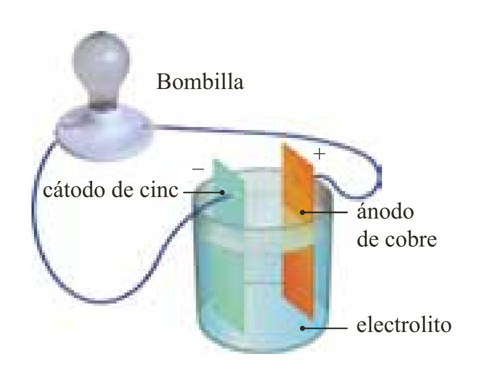


Figura 3. Componentes básicos de toda pila, batería y, en general, de un generador que como resultado de reacciones químicas en él, produce un voltaje.

Definición

La fuerza electromotriz (ε) de un generador es la energía (E) que suministra el dispositivo por cada unidad de carga eléctrica (Q) que recorre el circuito.

La fuerza electromotriz se expresa como:

$$\varepsilon = \frac{E}{Q}$$

La unidad de fuerza electromotriz en el SI es el julio sobre culombio (J/C), es decir, el voltio (V).

De la ecuación podemos obtener la energía (E) que produce un generador eléctrico y puesto que esta energía coincide con el trabajo total (W_T) realizado por el generador, tenemos que:

$$W_T = \varepsilon \cdot Q$$

1.2.3 Generadores eléctricos

La función de un generador es la de suministrar energía a los electrones libres de un conductor de tal modo que puedan recorrer la conexión eléctrica.

Los generadores como las pilas y las baterías producen un voltaje debido a reacciones químicas que ocurren en el interior. Todas las pilas, baterías o acumuladores, tienen los mismos componentes básicos: dos electrodos, uno positivo y otro negativo y, un electrolito en el que se transfieren cargas iónicas entre los electrodos (figura 3).

Las pilas actuales de 1,5 V son pilas secas, en las cuales el electrodo positivo es una barra de carbono, el electrodo negativo es un cilindro de cinc y el electrolito una pasta de cloruro de cinc, cloruro de amoniaco y dióxido de manganeso.

Las pilas, que encontramos en las calculadoras o relojes conocidas normalmente como baterías de mercurio de 1,4 V, están compuestas por un electrodo negativo de cinc, un electrodo positivo de óxido de mercurio y un electrolito de una disolución de hidróxido de potasio.

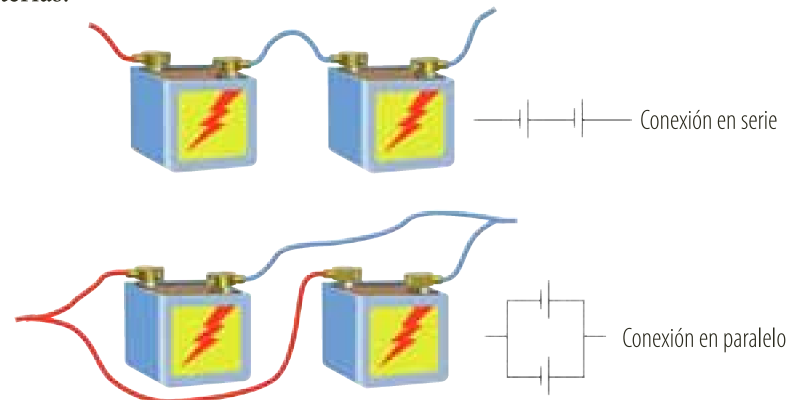
En 1842 Gastón Planté construyó las baterías que hoy se usan en autos y aviones llamadas baterías secundarias, las cuales pueden recargarse al invertir la reacción química del electrolito. Su ventaja principal es que puede producir una corriente eléctrica suficiente para arrancar un motor, sin embargo, se agota rápidamente. El electrolito es una disolución diluida de ácido sulfúrico, el electrodo negativo es de plomo y el electrodo positivo de dióxido de plomo. Otro tipo de pilas, muy ecológicas, son las pilas solares que generan electricidad por una conversión fotoeléctrica.

En ocasiones resulta muy útil realizar conexiones entre varios generadores iguales. Esta conexión puede realizarse de dos maneras y depende exclusivamente de la necesidad que se tenga:

- Si se desea aumentar el voltaje del circuito, se hace una conexión de dos o más generadores del mismo voltaje. Esta conexión consiste en unir el polo positivo de un generador con el polo negativo del otro, realizando de esta manera una conexión denominada en serie, en donde el voltaje resultante es la suma del voltaje de cada generador.

- Si se desea aumentar el tiempo de duración del voltaje en el circuito, se hace una conexión de generadores del mismo voltaje en paralelo, en donde se conectan los polos de igual signo de cada pila entre sí. Aunque en esta conexión se mantiene el voltaje, cada pila aporta una parte de su corriente.

En la siguiente figura se representan los tipos de conexión para dos baterías:

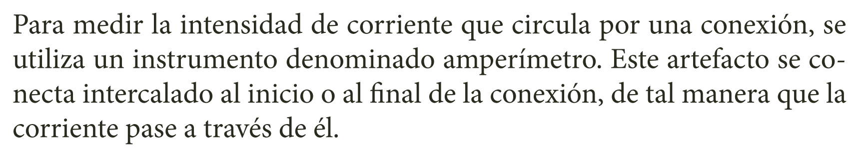


1.3 Medida de la corriente y el voltaje



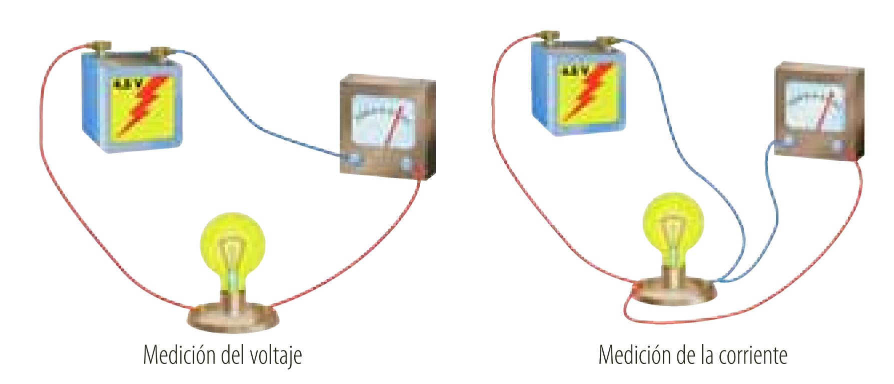
$1\ \mu A = 1 \cdot 10^{-3}\ A$

$1\ \mu A = 1 \cdot 10^{-6}\ A$



Para medir la intensidad de corriente que circula por una conexión, se utiliza un instrumento denominado amperímetro. Este artefacto se conecta intercalado al inicio o al final de la conexión, de tal manera que la corriente pase a través de él.

Todo instrumento que puede indicar la presencia de corriente en una conexión se denomina galvanómetro. De acuerdo con su calibración este instrumento puede medir intensidades de varios cientos de amperios, es decir, se pueden realizar mediciones en amperios, miliamperios o microamperios.



Medición del voltaje

Medición de la corriente

La diferencia de potencial o voltaje se mide con un voltímetro. Para medir el voltaje al que se encuentra conectado una bombilla, se conecta cada terminal del voltímetro de la bombilla sin intercalar el instrumento en la conexión.

Existen instrumentos de medida que permiten realizar medidas del voltaje o de la corriente de una conexión, estos aparatos denominados multímetros son muy habituales y se encuentran con mayor facilidad en el mercado que los amperímetros y voltímetros.



1.4 Resistencia eléctrica

Las planchas, las bombillas y los fogones de las estufas eléctricas, así como algunos elementos de ciertos aparatos eléctricos suelen ser llamados resistencias, debido a que presentan una tendencia a evitar que una corriente eléctrica fluya a través de ellos. Esta característica se conoce con el nombre de **resistencia eléctrica** (R).

Cuando un voltaje (V) se aplica a los extremos de un conductor eléctrico, fluye en el conductor una corriente eléctrica i. De esta manera la resistencia del conductor se expresa como:

$$R = \frac{V}{i}$$

Esta expresión permite demostrar que a medida que aumenta la resistencia generada por el conductor, disminuye la intensidad de corriente que pasa por él.

En el SI la resistencia eléctrica se expresa en ohmios (Ω), en memoria del físico alemán George S. Ohm.

El origen de la resistencia eléctrica se encuentra a nivel microscópico, en la estructura atómica del resistor. Por ejemplo, en los sólidos los átomos se encuentran distribuidos de tal manera que forman redes a una distancia que varía de un material a otro. Cuando se establece una corriente eléctrica a través del material, se producen miles de choques entre los átomos de la red y los electrones.

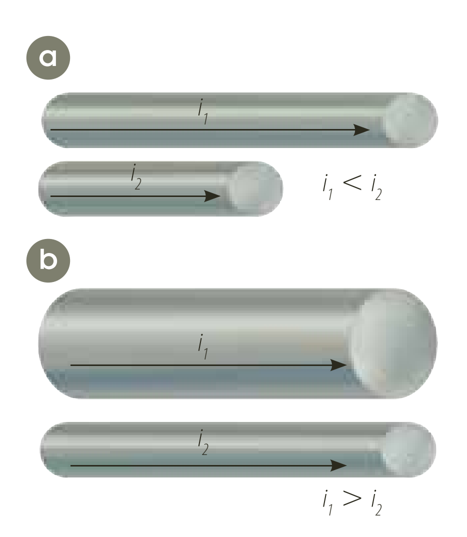


Figura 4. La resistencia de un conductor eléctrico depende de su longitud y de su área transversal. a) Si el área de la superficie transversal del conductor es constante, la resistencia es directamente proporcional a su longitud. b) Si la longitud del conductor es constante, la resistencia es inversamente proporcional al área de su superficie transversal.

1.4.1 Resistividad de un material

Desde un punto de vista macroscópico, es posible determinar que la resistencia de un conductor eléctrico depende de su forma. La resistencia de cualquier material, con un área transversal uniforme depende de cuatro aspectos: longitud, área de la sección transversal, clase del material y temperatura.

Si consideramos diferentes conductores, como los que se observan en la figura 4a, es posible calcular que cuando se presenta una mayor longitud, existe una gran probabilidad de choques entre las cargas, por lo cual se ofrece una mayor oposición al paso de la corriente, aumentando así la resistencia del material. Experimentalmente se encuentra que la resistencia R y la longitud l son dos magnitudes directamente proporcionales, es decir:

$$R \propto l$$

Si la superficie transversal presenta una mayor área (figura 4b), existe un mayor flujo eléctrico, así como ocurre con el flujo de agua en un tubo de gran diámetro en comparación con uno más angosto. Si este flujo es mayor, la resistencia que ofrece el conductor es menor, por lo cual, se presenta una relación inversamente proporcional:

$$R \propto \frac{1}{A}$$

Sin embargo, también influye la resistividad eléctrica (ρ) propia de cada material. Por tanto, la resistencia eléctrica de un conductor queda definida por la expresión:

$$R = \rho \cdot \frac{1}{A}$$

Tabla 6.1

Material	Resistividad ($\Omega \cdot m$)	α (°C)$^{-1}$
Plata	$1,6 \times 10^{-8}$	$6,8 \times 10^{-3}$
Cobre	$1,7 \times 10^{-8}$	$6,8 \times 10^{-3}$
Aluminio	$2,6 \times 10^{-8}$	$4,2 \times 10^{-3}$
Hierro	$9,7 \times 10^{-8}$	$6,5 \times 10^{-3}$
Germanio	$4,2 \times 10^{-1}$	250×10^{-3}

Así, para cada material, la medida de la resistencia de un conductor de largo 1 m y de área 1 m^2 se conoce como resistividad y se mide en ohmios por metro ($\Omega \cdot m$).

La resistividad de un material y, por tanto, la resistencia dependen de la temperatura, ya que al elevar la temperatura de un conductor aumenta la rapidez del movimiento aleatorio de las cargas, por lo cual disminuye el orden de su arreglo lo cual influye en el flujo de electrones.

Cuando el cambio de temperatura es despreciable, la resistencia de los metales aumenta casi linealmente, es decir:

$$\rho_T = \rho_0 (1 + \alpha \cdot \Delta T)$$

Donde ρ_0 es la resistividad a determinada temperatura inicial, que por lo general es de 20 °C o 0 °C. Por otra parte, ρ_T es la resistividad a una temperatura ΔT mayor o menor que la inicial y α es el coeficiente térmico de la resistividad.

En la tabla 6.1 se indican los coeficientes de temperatura y la resistividad de algunos materiales a 20 °C.

EJEMPLO

Considerar dos alambres, uno de plata y el otro de cobre cuyos diámetros son de 0,25 cm. Determinar:

a. ¿Cuál debe ser la longitud del alambre de plata para igualar la resistencia de uno de cobre cuya longitud es de 10 m, a una temperatura de 20 °C?

b. ¿En cuánto aumenta la resistencia del alambre de cobre, si se calienta hasta alcanzar una temperatura de 100 °C?

Solución:

a. Antes de hallar la longitud del alambre de plata (Ag), hallemos la resistencia del alambre de cobre (Cu). Para ello usamos los datos de la tabla 6.1 y calculamos el área de la sección de alambre:

$A = \pi \cdot r^2$ *Área del círculo*

$A = 3,14 \cdot (0,00125\ m)^2 = 4,91 \times 10^{-6}\ m^2$ *Al remplazar y calcular*

$R = \rho \cdot \frac{l}{A} = 1,7 \times 10^{-8}\ \Omega \cdot m \cdot \frac{10\ m}{4,91 \times 10^{-6}\ m^2} = 3,46 \times 10^{-2}\ \Omega$ *Al calcular*

Al remplazar en la ecuación de la resistencia, los valores para la plata tenemos que:

$$3,46 \times 10^{-2}\ \Omega = 1,6 \times 10^{-8}\ \Omega \cdot m \cdot \frac{l}{4,91 \times 10^{-6}\ m^2}$$

$l = 10,6\ m$ *Al calcular*

Por tanto, 10 m de alambre de cobre tiene la misma resistencia de 0,035 Ω que 10,6 m de alambre de plata. Pese a esto sale más económico usar cobre y no plata.

b. Para hallar el aumento de la resistencia del alambre de cobre al elevar la temperatura a 100 °C, tenemos:

$\rho_T = \rho_0 (1 + \alpha \cdot \Delta T)$

$\rho_{100\ °C} = (1,7 \times 10^{-8}) (1 + 6,8 \times 10^{-3}\ °C^{-1} \cdot 80\ °C)$ *Al remplazar*

$\rho_{100\ °C} = 2,62 \times 10^{-8}\ \Omega \cdot m$ *Al calcular*

$R_{100\ °C} = 2,62 \times 10^{-8}\ \Omega \cdot m \cdot \frac{10\ m}{4,91 \times 10^{-6}\ m^2} = 5,34 \times 10^{-2}\ \Omega$ *Al calcular*

La resistencia aumenta de 0,035 Ω a 0,053 Ω, al aumentar la temperatura de 20 °C a 100 °C, aun así sigue siendo mejor conductor que cualquier otro metal. Compara la resistividad en la tabla 6.1.

1.4.2 La ley de Ohm

El físico alemán Georg Simon Ohm encontró que para muchos conductores, especialmente los metales, la intensidad de corriente i que fluye a través de ellos es directamente proporcional a la diferencia de potencial o voltaje V, es decir:

$$\frac{V}{i} = constante$$

La constante de proporcionalidad se denomina resistencia eléctrica R, que corresponde a una medida de la oposición que presenta un elemento del circuito al flujo de la corriente.

Esta relación le permitió concluir que en un conductor existe una proporcionalidad directa entre la diferencia de potencial y la intensidad de corriente que lo recorre. Dicha conclusión se conoce como **ley de Ohm**, la cual se expresa como:

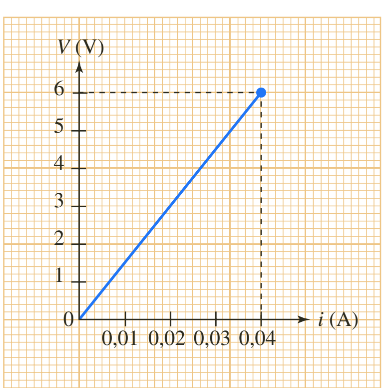
$$\frac{V}{i} = R$$

O bien como,

$$V = i \cdot R$$

En la siguiente figura se observa una gráfica obtenida a partir de la relación entre el voltaje y la corriente.

Para cada par de valores, el cociente entre estas magnitudes es igual, por tanto la gráfica es una línea recta.



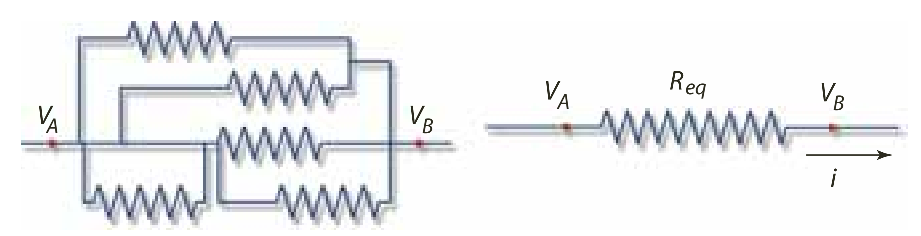
EJERCICIO

Una resistencia de 4 kΩ se conecta a una batería de 12 V. ¿Cuál es la intensidad de corriente que circula por la resistencia?

1.5 Asociación de resistencias

En los circuitos eléctricos se utilizan conductores que se caracterizan por su resistencia. Estos conductores utilizados para unir el resto de los elementos de un circuito tienen una resistencia despreciable y solamente las llamadas resistencias eléctricas tienen un valor significativo de esta magnitud.

En un circuito pueden usarse varias resistencias. En esta situación se define la resistencia equivalente (R_{eq}) de un conjunto de resistencias, como el valor de una resistencia hipotética por la cual al aplicarle la misma diferencia de potencial que al conjunto, circula la misma intensidad de corriente eléctrica que en el conjunto. En la siguiente figura se representa la resistencia equivalente para un conjunto de resistencias.



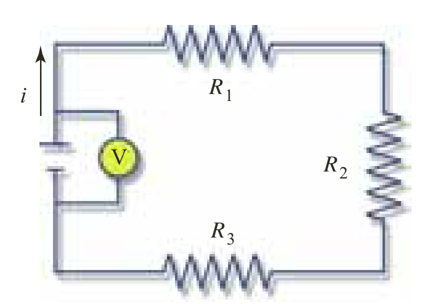


Figura 5. Circuito en serie en el que las resistencias están conectadas una a continuación de la otra, debido a esto la intensidad de la corriente que fluye por cada una es la misma.

1.5.1 Resistencias en serie

Dos o más resistencias se encuentran asociadas en serie cuando están conectadas unas a continuación de otras, de tal forma que cada una de ellas hace parte del circuito, como se observa en la figura 5.

En este caso, todas las cargas que circulan por la primera resistencia pasan por la segunda y las que circulan por la segunda resistencia pasan por la tercera y así sucesivamente. Por tanto, la intensidad de corriente que fluye por cada resistencia siempre es la misma, es decir:

$$i = i_1 = i_2 = i_3$$

En una asociación en serie la diferencia de potencial en cada resistencia depende del valor de resistencia de cada una. Sin embargo, el voltaje proporcionado por la fuente será igual a la suma de la diferencia de potencial de cada resistencia, por tanto:

$$V = V_1 + V_2 + V_3$$

Como cada voltaje corresponde a la ley de Ohm, entonces:

$$V_1 = i \cdot R_1 \qquad V_2 = i \cdot R_2 \qquad V_3 = i \cdot R_3$$

En donde V_1, V_2 y V_3 corresponden a las diferencias de potencial existentes en los tres extremos de cada una de las resistencias. Aplicando la ley de Ohm al conjunto de las tres resistencias tenemos que:

$$V = i \cdot R_{eq}$$

Donde V es la diferencia de potencial entre los extremos del conjunto y R_{eq} la resistencia equivalente. Entonces según la ley de Ohm:

$$i \cdot R_{eq} = i \cdot R_1 + i \cdot R_2 + i \cdot R_3$$

Así al simplificar, la resistencia equivalente cuando existe una asociación de resistencias en serie es:

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3$$

Definición

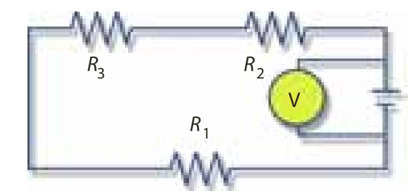
La resistencia equivalente a varias resistencias asociadas en serie es igual a la suma de todas las resistencias conectadas.

EJEMPLO

Tres resistencias se encuentran asociadas en serie. Determinar:

a. La resistencia equivalente.

b. La intensidad de corriente que circula por cada una de ellas, si el voltaje de la fuente es de 12 V.



Solución:

a. Para calcular la resistencia equivalente se tiene que:

$$R_{eq} \cdot i = R_1 + R_2 + R_3$$

$$R_{eq} = 2\ \Omega + 4\ \Omega + 6\ \Omega = 12\ \Omega$$

La resistencia equivalente del circuito es 12 Ω.

b. Como la intensidad de corriente es igual, la calculamos en el circuito equivalente:

$V = i \cdot R$

$12\ \text{V} = i \cdot 12\ \Omega$ *Al remplazar*

$i = \dfrac{12\ \text{V}}{12\ \Omega} = 1\ \text{A}$ *Al despejar i y calcular*

La corriente que pasa por cada resistencia es de 1 A.

1.5.2 Resistencias en paralelo

En el caso de las resistencias asociadas en paralelo, estas se encuentran unidas de sus extremos, es decir, que cada una de ellas forma parte de una rama diferente que divide el circuito, tal como se observa en la figura 6.

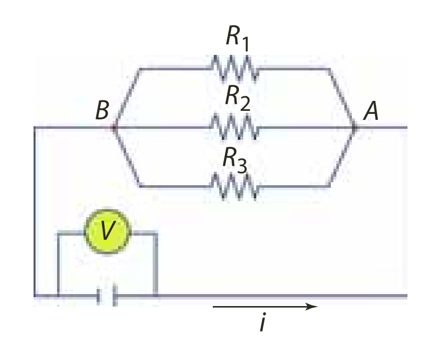


Figura 6. Circuito en paralelo en el que las resistencias se encuentran unidas en sus extremos, por lo que la diferencia de potencial de cada resistencia es la misma.

Como las resistencias no se encuentran distribuidas de la misma manera, las cargas que llegan al punto A se reparten:

- Por la rama en la cual se encuentra la resistencia R_1.
- Por la rama en la cual se encuentra la resistencia R_2.
- Por la rama en la cual se encuentra la resistencia R_3.

Por tanto, la intensidad de corriente "se divide" por cada una de las ramas. Como la carga eléctrica se conserva, el número de cargas que circulan por las tres ramas corresponden al número de carga que ingresó en el punto A y que posteriormente saldrá por el punto B, es decir:

$$i = i_1 + i_2 + i_3$$

Las cargas eléctricas no se reparten por las diferentes ramas de forma aleatoria, estas se desplazan hacia la rama del circuito en la cual la resistencia es menor. De esta manera, la intensidad es menor por la rama del circuito en la que la resistencia es mayor.

En una asociación en paralelo la diferencia de potencial en cada resistencia es la misma, ya que cada resistencia se encuentra conectada al mismo punto, que en este caso corresponde al punto A. Así que:

$$V_1 = V_2 = V_3 = V_4$$

Si aplicamos la ley de Ohm a cada una de las resistencias tenemos que:

$$i_1 = \frac{V}{R_1} \qquad i_2 = \frac{V}{R_2} \qquad i_3 = \frac{V}{R_3}$$

Por lo cual, la corriente en el conjunto es:

$$I = \frac{V}{R_{eq}}$$

Entonces,

$$\frac{V}{R_{eq}} = \frac{V}{R_1} + \frac{V}{R_2} + \frac{V}{R_3}$$

Por tanto al simplificar, la resistencia equivalente cuando se presenta una asociación de resistencias en paralelo es:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

Definición

El inverso de la resistencia equivalente de varias resistencias asociadas en paralelo es igual a la suma de los inversos de las resistencias que se asocien.

EJEMPLO

Calcular la resistencia del circuito.

$R_3 = 6\ \Omega$
$R_2 = 4\ \Omega$
$R_1 = 2\ \Omega$
V
i

Solución:

Para hallar la resistencia equivalente tenemos que:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{2\Omega} + \frac{1}{4\Omega} + \frac{1}{6\Omega}$$ *Al remplazar*

$R_{eq} = 1{,}1\ \Omega$ *Al calcular*

La resistencia equivalente es 1,1 Ω.

Al conectar resistencias en paralelo, la resistencia equivalente disminuye y, por lo tanto, la corriente en el circuito aumenta. Por eso, debes ser cuidadoso al conectar muchos aparatos a una misma toma, puedes ocasionar un corto circuito que es una sobrecarga.

EJERCICIO

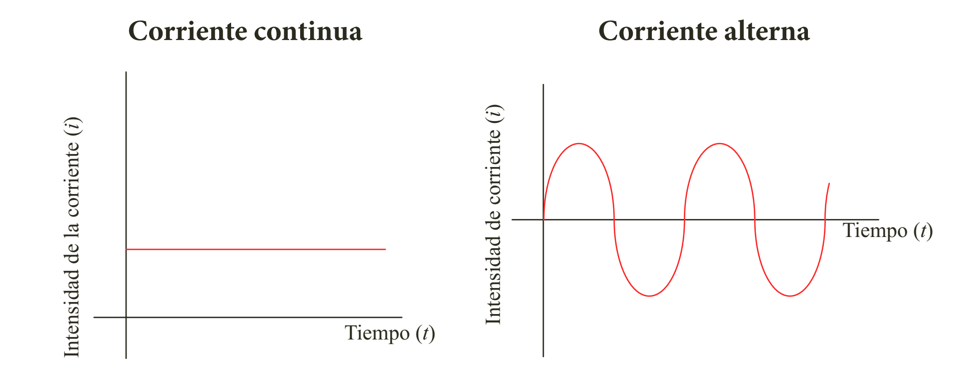
Explica las diferencias entre la corriente continua y la corriente alterna.

1.6 Corriente continua y corriente alterna

Los generadores como las pilas y las baterías generan un voltaje debido a reacciones químicas que ocurren en su interior. Este voltaje se presenta de una manera continua, por lo cual fluye una corriente continua que siempre recorre el circuito en el mismo sentido.

Sin embargo, la corriente para el funcionamiento de máquinas industriales y electrodomésticos no es continua sino que cambia a medida que transcurre el tiempo, por esto se llama corriente alterna. Para producir este tipo de corriente se requiere un generador eléctrico cuya diferencia de potencial se invierte alternadamente, es decir, produce un voltaje alterno.

A continuación, se representan gráficamente la intensidad de la corriente continua y alterna en función del tiempo.



Algunos aparatos eléctricos, como las grabadoras funcionan bien sea con pilas, es decir, con corriente continua, o al conectarla en una toma de la casa, es decir, con corriente alterna. Este efecto se hace posible gracias a ciertos elementos que se encuentran en su interior, como transformadores y rectificadores, que regulan el voltaje y permiten que la corriente pase en un solo sentido.

2. Circuitos eléctricos

2.1 El circuito eléctrico

Para hacer funcionar un artefacto eléctrico es necesario lograr que los electrones libres recorran varias veces el interior de los conductores. Así cada vez que enciendes el televisor, el equipo de sonido o una linterna, haces fluir una corriente de electrones en un **circuito eléctrico**.

Un circuito eléctrico es un conjunto de conductores unidos a uno o varios generadores de corriente eléctrica, que mantienen el flujo de electrones constante en el tiempo.

Además de los generadores existen otros elementos que forman parte de un circuito: los interruptores, los conectores y los aparatos eléctricos.

- **Los interruptores** son dispositivos que permiten interrumpir a voluntad el paso de la corriente por un circuito.
- **Los conectores** son cables y demás conexiones que unen los distintos elementos que forman el circuito. En general, son fabricados a partir de los metales y, como tales, constituyen puntos de igual potencial cada uno.
- **Los aparatos eléctricos** son los instrumentos o los dispositivos que funcionan cuando circula una corriente a través de ellos.

Todos los elementos de los circuitos eléctricos suelen ser representados por medio de símbolos, que son reconocidos mundialmente y que permiten simplificar el proceso de diagramación de un circuito (tabla 6.2).

Para que un circuito funcione es necesario crear un camino por el cual los electrones puedan circular. Cuando esto ocurre se dice que el circuito está **cerrado**. Si se desconecta el interruptor o alguno de los cables la corriente deja de fluir y se dice que el circuito está **abierto**.

generador
receptor
interruptor
conductor

generador
receptor
interruptor
conductor

Cuando las dos terminales de una pila se conectan directamente con un alambre, la corriente eléctrica circula por este pero no llega a la bombilla y por tanto, no enciende. Esta conexión se denomina **corto circuito**, y en ella el alambre se calienta tanto que puede producir un incendio.

Cuando por error se provoca un corto circuito en casa, se observa un chispazo, se presenta un olor a cable quemado y, muy posiblemente, se bajan los tacos o se funden los fusibles.

Tabla 6.2

Elemento	Símbolo
Conductor	
Pila	
Resistencia	
Interruptor abierto	
Interruptor cerrado	
Motor	M
Generador	G
Amperímetro	A
Voltímetro	V



Figura 7. Un circuito eléctrico está formado por un generador de corriente eléctrica y por los receptores.

2.2 Energía en los circuitos

Un circuito eléctrico está formado por un generador, que es el elemento encargado de producir y mantener la corriente, y por los receptores (bombillas, motores y resistencias) que reciben la energía de la corriente eléctrica y la transforman en otros tipos de energía.

Cuando se conecta una bombilla a un generador, la energía produce un movimiento vibratorio de los electrones del filamento de la bombilla. De esta energía, la mayor parte se transforman en calor y la otra en luz.

Si una resistencia es sometida a una diferencia de potencial ΔV, la energía potencial de la carga q que fluye a través de la resistencia, disminuye y, por tanto se presenta una caída de potencial.

La variación de la energía y la diferencia de potencial se relacionan mediante la expresión:

$$\Delta V = \frac{\Delta E_P}{q}$$

Es decir,

$$\Delta E_P = \Delta V \cdot q$$

A partir de la definición de la intensidad de corriente, obtenemos que la cantidad de carga que circula por la resistencia en función del tiempo es: $q = i \cdot t$, por tanto:

$$\Delta E_P = \Delta V \cdot i \cdot t$$

Esta energía es aportada por el generador y consumida por la bombilla de resistencia R. Como la ley de Ohm afirma que $\Delta V = i \cdot R$, entonces la energía es:

$$\Delta E_P = i^2 \cdot R \cdot t$$

Siendo el julio (J) su unidad de medida en el SI.

2.2.1 Potencia eléctrica

La potencia eléctrica es la rapidez con la cual se realiza un trabajo. En el caso de la potencia eléctrica, corresponde al trabajo realizado por el campo eléctrico durante cierto tiempo t.

Este trabajo que realiza el campo eléctrico sobre los electrones de una resistencia resulta ser la variación de la energía potencial, ΔE_P. Por tanto, la potencia eléctrica P, se encuentra dada por la expresión:

$$P = \frac{\Delta E_P}{t}$$

Como $\Delta E_P = \Delta V \cdot i \cdot t$, entonces:

$$P = \frac{i \cdot \Delta V \cdot t}{t}$$

Es decir, que la potencia eléctrica es:

$$P = i \cdot \Delta V$$

La unidad de potencia es el vatio (W), que se define como 1 J/s. Otra unidad muy conocida de la potencia es el kilovatio (kW) equivalente a 1.000 vatios.

Cuando por una resistencia circula una corriente y el potencial en uno de sus extremos es cero y en el otro es V, la potencia que consume la resistencia está dada por la expresión:

$$P = i^2 \cdot R$$

Pero, como la ley de Ohm afirma que $i = \frac{V}{R}$, entonces:

$$P = \frac{V^2}{r}$$

EJEMPLO

En el ámbito industrial y doméstico la energía eléctrica se mide en kilovatios-hora (kWh), que es la energía que consume un aparato eléctrico de 1 kW de potencia durante una hora. Si los artefactos funcionan a un voltaje de 120 V y 1 kWh cuesta $35,18, calcular cuánto dinero cuesta la energía que consumen en un mes (30 días):

- una nevera, de potencia 200 W, que permanece conectada.
- una plancha, de potencia 800 W, que usan 18 horas durante el mes.
- un televisor, de potencia 200 W, que se usa 8 horas durante el día.

Solución:

Para calcular el dinero que cuesta la energía consumida por los electrodomésticos despejamos E de la ecuación de potencia eléctrica: $E = P \cdot t$

Si E_n es la energía consumida por la nevera, E_p la energía consumida por la plancha y E_t la energía consumida por el televisor, entonces:

$E_n = 0,2\text{ kW} \cdot 720\text{ h} = 144\text{ kWh}$

$E_p = 0,8\text{ kW} \cdot 18\text{ h} = 14,4\text{ kWh}$

$E_t = 0,2\text{ kW} \cdot 240\text{ h} = 48\text{ kWh}$

Por tanto la energía total es:

$E_T = E_n + E_p + E_t = 144\text{ kWh} + 14,4\text{ kWh} + 48\text{ kWh}$

$E_T = 206,4\text{ kWh}$

Como 1 kWh cuesta $35,18, entonces:

Precio de la energía = 206,4 kWh · $35,18

Precio de la energía = $ 7.261,15

El consumo de energía por el concepto de estos electrodomésticos es $7.216,15.

2.2.2 El efecto Joule

Cuando por un conductor circula corriente eléctrica, parte de la energía se transforma en calor. Esto se debe a que los electrones en su movimiento chocan con las partículas del conductor, les transmiten parte de su energía y el conductor se calienta.

Esta energía se encuentra dada por la expresión:

$$\Delta E_p = i^2 \cdot R \cdot t$$

Este fenómeno, que recibe el nombre de efecto Joule, es el fundamento de los fusibles, los cuales son dispositivos de seguridad utilizados para proteger un circuito de un exceso de corriente.

Si la corriente del circuito excede un valor predeterminado, el calor generado en la lámina metálica, provista en el interior del fusible, se funde y así genera un circuito abierto.

2.3 La resistencia interna de las fuentes de voltaje

En un circuito eléctrico la resistencia de los conectores es despreciable debido a que esta es ocasionada por los demás componentes. Hasta el momento no habíamos considerado la resistencia generada por la fuente de voltaje, sin embargo, realmente toda fuente tiene una resistencia interna debida a los choques entre los iones del electrolito.

Cuando un circuito se cierra, el voltaje V entre los polos positivo y negativo de la fuente resulta ser menor que el de la fem, pero cuando el circuito se abre, el voltaje V se iguala al de la fem. La caída de potencial cuando circula corriente se debe a la resistencia interna de la fuente r y a la resistencia R. Si llamamos V_r a la caída de potencial debido a r, entonces:

$$\varepsilon = V_r + V$$

La fem es una característica de la fuente, mientras que la diferencia de potencial entre sus polos depende de su resistencia interna. Como por las dos resistencias pasa la misma intensidad de corriente i, al aplicar la ley de Ohm se obtiene que:

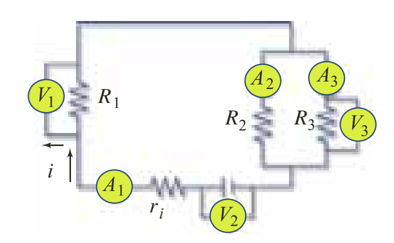
$$\varepsilon = i \cdot r + i \cdot R$$

Es decir,

$$i = \frac{\varepsilon}{R + r}$$

EJEMPLO

Calcular la lectura de cada aparato en el circuito, si la fem de la fuente es de 9 V, la resistencia interna de 0,5 Ω, $R_1 = 5\ \Omega$, $R_2 = 8\ \Omega$, $R_3 = 10\ \Omega$.



Solución:

Para hallar la lectura de A_1, primero hallamos la resistencia equivalente entre R_2 y R_3:

$$\frac{1}{R_{eq2,3}} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{10} + \frac{1}{8} = \frac{40}{9} =$$

$$= 4{,}44\ \text{V}$$

Como $R_{eq2,3}$ está en serie con R_1 y r, hallamos la R equivalente del circuito:

$$R_{eq} = R_r + R_1 + R_{eq_{2,3}}$$

$$R_{eq} = 4{,}44\ \Omega + 5\ \Omega + 0{,}5\ \Omega = 9{,}9\ \Omega$$

Por tanto,

$$V = i \cdot R$$

$$I = \frac{V}{R} = \frac{9\ \text{V}}{9{,}9\ \Omega} = 0{,}91\ \text{A}$$

La lectura de A_1, es 0,91 A.

Para realizar la lectura de V_2, hallamos primero la caída de potencial en r:

$$V = 0{,}91\ \text{A} \cdot 0{,}5\ \Omega = 0{,}45\ \text{V}$$

Como $E = V_r + V_2$, entonces

$$V_2 = E - V_r = 9\ \text{V} - 0{,}45\ \text{V} = 8{,}55\ \text{V}$$

La lectura de V_2 es 8,55 V.

La lectura de V_1 es:

$$V_1 = 5\ \Omega \cdot 0{,}91\ \text{A} = 4{,}55\ \text{V}$$

La lectura de V_3 es:

$$V_3 = V_2 - V_1 = 8{,}55\ \text{V} - 4{,}55\ \text{V} = 4\ \text{V}$$

Como V es igual en R_2 y R_3, la lectura de A_2 y A_3 es:

$$i_2 = \frac{4\ \text{V}}{8\ \Omega} = 0{,}5\ \text{A} \qquad i_3 = \frac{4\ \text{V}}{10\ \Omega} = 0{,}4\ \text{A}$$

La lectura de A_2 es: 0,5 A y la de A_3 es 0,4 A.

2.4 Las leyes de Kirchhoff

Para resolver circuitos más complejos como el que se observa en la siguiente figura, ya no es suficiente la ley de Ohm. Por tal razón se recurre, a dos leyes muy prácticas que propuso Kirchhoff, a mediados del siglo XIX.

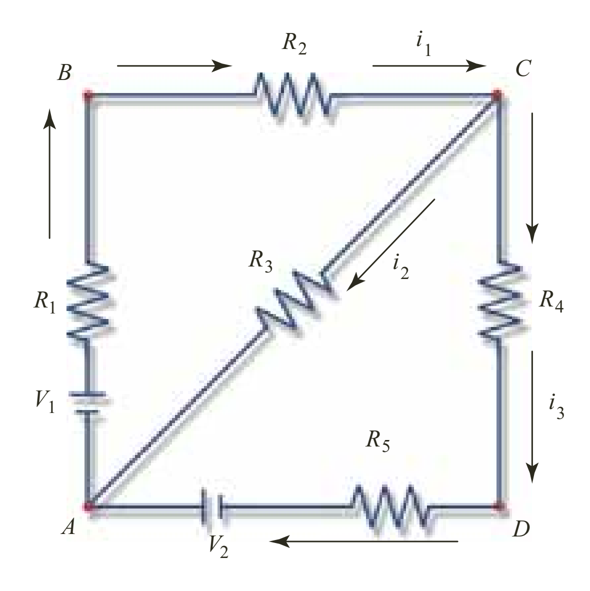




Figura 8. Kirchhoff creó la leyes para desarrollar circuitos eléctricos.

La primera ley, denominada la ley del nudo, se emplea para resolver aquellos puntos en los cuales se unen mínimo tres conductores, como ocurre en los puntos *A* y *C*. Kirchhoff en esta ley afirma que: **en cualquier nudo, la suma de todas las corrientes que entran debe ser igual a la suma de todas las corrientes que salen, es decir:**

$$i_1 = i_2 + i_3$$

La segunda ley, denominada ley de la malla o regla de los circuitos, se utiliza para considerar aquellas trayectorias cerradas, como *ABCA, CDAC* o *ABCDA*. Kirchhoff afirma en esta ley que: **la suma algebraica de los cambios de potencial en torno a cualquier trayectoria cerrada de una malla debe ser cero.**

Estas trayectorias cerradas se pueden comparar con el campo gravitacional, por ejemplo, si se lanza una pelota verticalmente hacia arriba, esta gana energía potencial a medida que sube, pero pierde su energía cinética. Posteriormente, desciende perdiendo energía potencial hasta alcanzar su posición inicial. La diferencia de energía potencial al empezar y terminar la trayectoria es cero al igual que si una carga de prueba recorre todo el circuito y llega a la misma posición, su diferencia de potencial es cero.

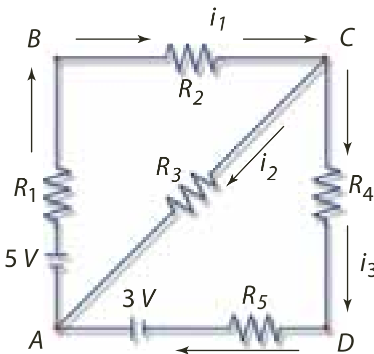
Al aplicar esta ley en varias mallas, es necesario optar siempre por el mismo sentido, ya sea positivo o negativo.

Para resolver un circuito mediante las reglas de Kirchhoff, es conveniente tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Darle un sentido de forma arbitraria a la corriente que pasa por cada rama del circuito.
- Usar siempre el mismo sentido al recorrer las trayectorias cerradas.
- Determinar por medio de las reglas de Kirchhoff, el mismo número de ecuaciones que de incógnitas.

EJEMPLO

Calcular las corrientes i_1, i_2 e i_3 en cada uno de los ramales del circuito de la figura, si $R_1 = 2\ \Omega$, $R_2 = 4\ \Omega$, $R_3 = 3\ \Omega$, $R_4 = 1\ \Omega$ y $R_5 = 5\ \Omega$.



Solución:

Lo primero que debemos hacer es darle un sentido a la corriente en cada ramal del circuito, este se realiza en forma arbitraria, tal como se señalan en la figura. Como tenemos tres incógnitas debemos hallar tres ecuaciones.

Una ecuación resulta al aplicar la ley de los nudos en el nudo *C*:

$$i_1 = i_2 + i_3$$

La segunda ecuación resulta al aplicar la ley de las mallas en la trayectoria cerrada *ABCA*, se debe realizar en el mismo sentido todas las trayectorias cerradas del circuito, en este caso escogimos el sentido negativo.

Ten presente que:

- En una resistencia el voltaje va precedido de signo menos si el sentido del recorrido del circuito es igual al sentido de la corriente, de lo contrario, es positivo.
- El voltaje en una fuente va precedido de signo más si al recorrer el circuito pasa primero por el terminal negativo y luego por el positivo.

Al aplicar la ley de nudos y la ley de Ohm para cada resistencia, tenemos que:

$$-5\ \text{V} - 2\ \Omega \cdot i_1 - 4\ \Omega \cdot i_1 - 3\ \Omega \cdot i_2 = 0$$

$$i_2 = \frac{5\ \text{V} + 6 \cdot i_1}{-3\ \Omega} = -1{,}67\ \text{V} - 2 \cdot i_1 \qquad \textit{Al despejar } i_2 \textit{ y calcular}$$

La tercera ecuación resulta al emplear la regla de los circuitos en la trayectoria cerrada *ABCDA*. Al aplicar la ley de nudos y la ley de Ohm para cada resistencia, se tiene que:

$$-5\ \text{V} - 2 \cdot i_1 - 4 \cdot i_1 - i_3 - 5 \cdot i_3 - 3\ \text{V} = 0$$

$$i_3 = \frac{8\ \text{V} + 6 \cdot i_1}{-6} = -1{,}34\ \text{V} - i_1 \qquad \textit{Al despejar } i_3 \textit{ y calcular}$$

Al remplazar las expresiones para i_2 e i_3 en la ecuación $i_1 = i_2 + i_3$, tenemos:

$$i_1 = (-1{,}67 - 2 \cdot i_1) + (-1{,}34 - i_1)$$

$$i_1 = -\ 0{,}75\ \text{A} \qquad \textit{Al despejar } i_1 \textit{ y calcular.}$$

El signo negativo significa que el sentido de i_1 es contrario al que le asignamos arbitrariamente.

Al remplazar en la expresión encontrada para i_2 , se obtiene:

$$i_2 = -1{,}67 - 2\,(-0{,}75\text{A}) = -0{,}17\ \text{A} \qquad \textit{Al calcular}$$

Al remplazar en la expresión encontrada para i_3, se obtiene:

$$i_3 = -1{,}34\ \text{A} + 0{,}75\ \text{A} = -0{,}59\ \text{A}$$

Así, queda resuelto el circuito, de tal manera que el sentido real de las corrientes es el contrario al valor negativo que le asignamos arbitrariamente en la figura. Por tanto, los valores de las corrientes son:

$$i_1 = 0{,}75\ \text{A}; \qquad i_2 = 0{,}17\ \text{A}; \qquad i_3 = 0{,}59\ \text{A}$$



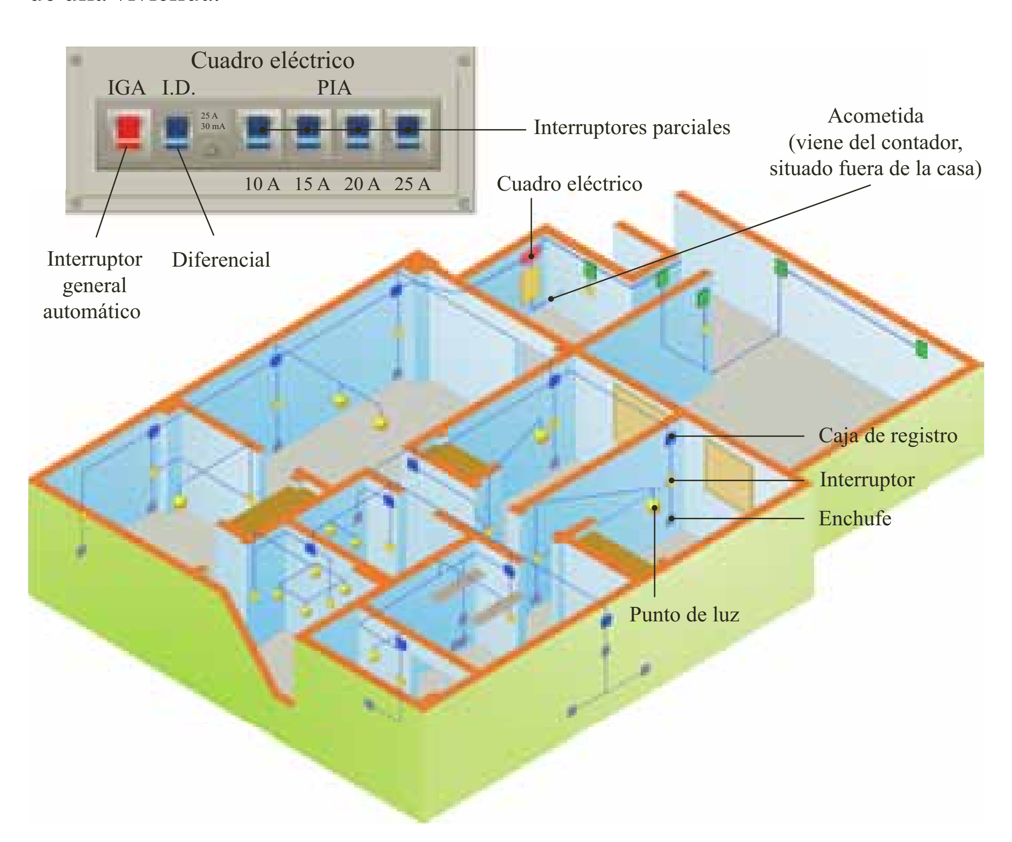
2.5 La electricidad en casa

En las centrales eléctricas, la electricidad que se genera es alterna, y la tensión se eleva antes de ser transportada a grandes distancias por los tendidos eléctricos. Luego, en el camino se van poniendo sucesivos transformadores hasta reducir esta tensión a la necesaria en cada caso (desde 10.000 V de tensión, en algunas industrias, hasta 110 V, en las viviendas).

Cuando la energía eléctrica llega a las viviendas, a la entrada de estas es necesaria la instalación de una serie de elementos de seguridad y control.

- **El contador:** este aparato mide la energía consumida. Su lectura suele realizarse cada mes por la compañía eléctrica. Normalmente está situado fuera de la vivienda.
- **Interruptor de control de potencia:** este artefacto limita la entrada de potencia a la vivienda.
- **Interruptor diferencial:** es un aparato de protección, el cual corta el suministro de energía cuando detecta fugas o derivaciones.
- **Interruptores parciales:** sirven para proteger los aparatos de sobrecargas.

En la siguiente figura, se muestra el esquema de una instalación eléctrica de una vivienda.



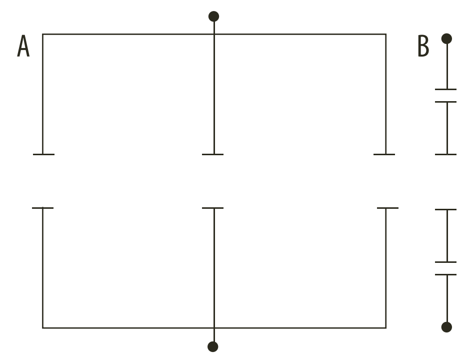
La instalación eléctrica en una vivienda consta de tres elementos fundamentales:

- **La fase:** es el conductor por el cual ingresa la corriente a la casa.
- **El neutro:** es el conductor por el cual sale la corriente eléctrica de la vivienda después de ser usada.
- **El polo a tierra:** es un conductor de protección, que envía las descargas eléctricas a tierra.



Interpreta

1 **Calcula la fuerza electromotriz producida por cada una de las combinaciones de las pilas que se muestran en la figura, si la fem de cada una es de 2 V.**



2 **Para determinar el valor de una resistencia de un conductor, se ha sometido a diferentes voltajes y en la siguiente tabla se consignaron los datos obtenidos:**

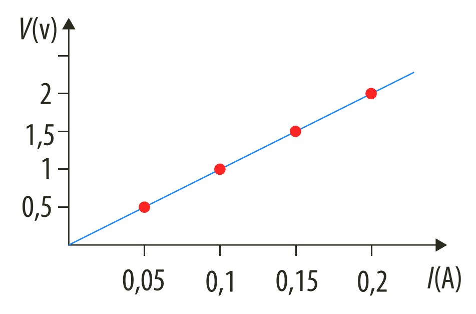
***V*(V)**	2	4	6	8	9,5	10,3
***i*(A)**	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6

a. Representa los datos en una gráfica de *V*-*i*.

b. A partir de los datos obtenidos, ¿se puede concluir que la resistividad no depende del voltaje?

c. ¿En qué tramo de la gráfica puede considerarse que el conductor cumple la ley de Ohm? Calcula la resistencia en ese tramo.

3 **En la siguiente gráfica se observa el voltaje en voltios y la corriente en amperios en un experimento donde se cambió progresivamente el voltaje en una resistencia. Halla el valor de la resistencia.**



4 **Un fusible es un dispositivo que consiste en un hilo de cobre o plomo. Cuando por algún motivo se produce un aumento en la corriente que pasa a través de él, se funde e interrumpe el flujo de carga. Explica el funcionamiento en términos del efecto Joule.**

Argumenta

5 **Las tormentas eléctricas cargan negativamente las nubes y, a su vez, provocan fuertes cargas eléctricas positivas en la Tierra. Los campos eléctricos producen iones y electrones libres en el aire, por lo que el aire se convierte en conductor de electricidad. Esto permite que el rayo se desplace de un lado a otro.**

El pararrayos está formado por una antena metálica, ubicada en la parte más alta de una edificación, que termina en punta, con una bola de cobre o platino cargada positivamente. La barra se conecta a tierra por un cable conductor, que lleva la descarga hacia el suelo y así evita daños a las personas que habitan un recinto cerrado.

a. ¿En Colombia hay hogares que no cuentan con pararrayos? Investiga.

b. ¿Por qué en la punta de los pararrayos aparecen fuertes cargas positivas?

c. ¿Por qué crees que el rayo va hacia la punta del pararrayos?

d. El lugar donde cae un rayo no se puede predecir. ¿Cómo explicarías a una persona que está parada en una azotea de un edificio que existe la posibilidad de que caiga un rayo?

Propone

6 **En las sierras y en las selvas son frecuentes las tormentas eléctricas. ¿Qué tipo de campaña realizarías para proteger la vida de los pobladores y de sus animales?**

7 **El mal uso de la electricidad causa muertes y lesiones graves. Escribe tres medios de prevención para evitar electrocutarse en la cocina y en la ducha.**

8 **Los recursos naturales escasean cada vez más debido al mal uso que les da el hombre. La energía eléctrica que llega a nuestro hogar es producida por fuentes de energía no renovables, como los combustibles fósiles, o usando recursos como el agua. Nuestra obligación es evitar el desperdicio de energía en nuestros hogares. Plantea recomendaciones que permitan ahorrar energía en los hogares.**

Actividades

Verifica conceptos

1 **Escribe V, si la afirmación es verdadera o F, si es falsa. Justifica tu respuesta.**

- ☐ La corriente eléctrica es un concepto asociado al movimiento de cargas.
- ☐ Uno de los efectos producidos por la corriente eléctrica es el desprendimiento de calor cuando hay flujo de electrones.
- ☐ Cuando hay flujo de electrones por un circuito, estos se mueven del polo positivo hacia el polo negativo.
- ☐ La función de un generador es suministrar energía a los electrones libres de un conductor de tal forma que puedan moverse por la conexión eléctrica.
- ☐ La resistencia de un material es inversamente proporcional a su área transversal.
- ☐ La ley de Ohm relaciona el voltaje con el calor generado cuando hay una diferencia de potencial en un circuito.
- ☐ La resistencia eléctrica en un circuito óhmico es el cociente entre la corriente y el voltaje.

2 **Completa la siguiente tabla.**

Símbolo	Representa	Unidad
I		
V	Voltios	
R		
	Resistividad	

3 **Escribe las diferencias que hay entre los siguientes conceptos:**

a. Corriente eléctrica e intensidad de corriente eléctrica.

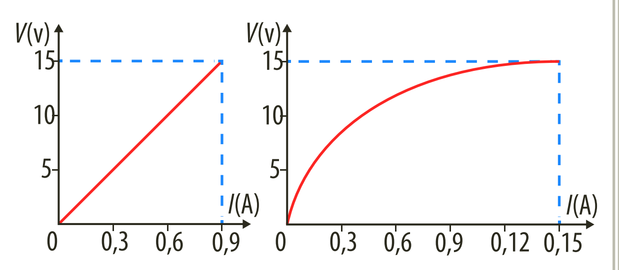
b. Resistencia eléctrica y resistividad de un material.

c. Resistencias en serie y resistencias en paralelo.

d. Corriente alterna y corriente continua.

Analiza y resuelve

4 **Las dos figuras corresponden a la representación *V*-*i* en los extremos de una resistencia.**



Responde:

a. ¿Cuál de las dos resistencias cumple con la ley de Ohm?

b. ¿Cuál es el valor de la resistencia para el caso que cumple con la ley de Ohm?

c. ¿Cuál es el valor de la intensidad de corriente que circula por la resistencia que cumple con la ley de Ohm cuando la diferencia de potencial es 25 V?

5 **Cuando se lava el petróleo con chorros de agua a gran presión hay que ser especialmente cuidadosos para que no se produzca una explosión de los vapores del combustible. Basándose en partículas cargadas por fricción explica por qué se puede producir la explosión.**

6 **Enumera algunos efectos producidos por la corriente eléctrica que conozcas y comenta alguna aplicación de los mismos.**

7 **Si se conectan a una pila de 12 V, tres resistencias en paralelo de 2Ω, 3Ω y 4Ω, respectivamente.**

a. Halla: ¿Por cuál de ellas la intensidad de corriente es mayor?

b. Haz un dibujo del circuito.

8 **Responde. ¿Por qué en los metales los electrones se mueven y los protones, no?**

9 **Responde. ¿Cómo se tienen que asociar tres resistencias de 6 Ω cada una, de manera que la resistencia equivalente del conjunto sea 9 Ω?**

10 **Responde. ¿Qué medirá un voltímetro si en vez de colocarlo en paralelo lo colocamos en serie?**

11 **Si aumenta la resistencia en el circuito, ¿la intensidad de corriente aumenta o disminuye? Explica tu respuesta.**



Actividades

Problemas básicos

12 **Una fuente fem realiza un trabajo de 3 J para llevar una carga de 2 C de un extremo a otro. Calcula la diferencia de potencial.**

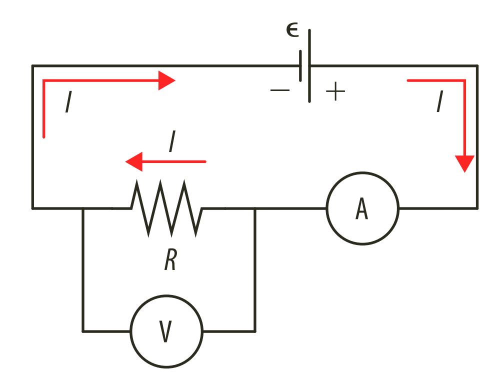
13 **Por un conductor de aluminio de 1 mm de diámetro y 10 m de largo, circula una corriente de 2 mA en 1 minuto. Calcula:**

a. La carga eléctrica que pasa por el conductor.

b. El número de electrones que pasan por la sección.

c. La resistencia del conductor.

14 **Una resistencia de carbono de 10 ohmios es conectada a una pila. Para medir el voltaje y la intensidad de corriente que pasa por el conductor, se conecta un voltímetro y un amperímetro a la resistencia, como se muestra en el esquema. Calcula la lectura del amperímetro cuando el voltímetro marque 3 V.**



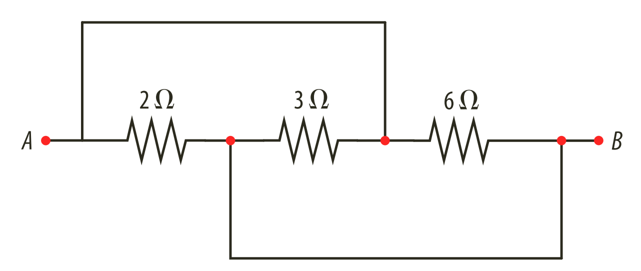
15 **Una aleación de resistencia inicial de 0,08 Ω varía su resistencia en 0,01 Ω cuando la temperatura aumenta en 10°. ¿Cuál es el valor de su coeficiente de dilatación lineal?**

16 **Dos resistencias de 100 kΩ y 400 kΩ son conectadas en paralelo y, a su vez, se conectan en serie a una resistencia de 40 kΩ. Todo el sistema es conectado a una batería ideal de 12 V. ¿Cuál es la intensidad de corriente que sale de la fuente?**

17 **En una feria se proyecta colocar 100 focos de igual resistencia, R = 50 Ω, en paralelo. Si los focos deben trabajar durante 5 horas continuas a una diferencia de potencial de 12 voltios, ¿cuántas baterías de 12 V y capacidad de 40 Ah como mínimo deben comprarse?**

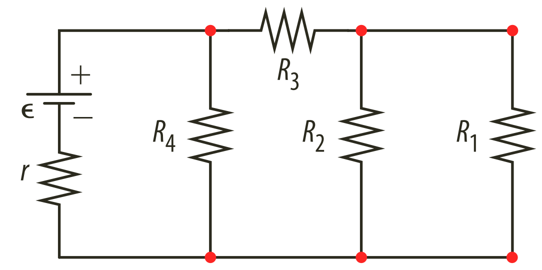
18 **Se tienen tres resistencias de 200 kΩ, 300 kΩ y 600 kΩ. ¿Cómo deben asociarse para dar el máximo y el mínimo valor en su resistencia total o equivalente?**

19 **En la figura, los puntos *A* y *B* tienen un potencial de 0,75 V y −0,75 V, respectivamente. Calcula la intensidad de corriente en cada resistencia.**

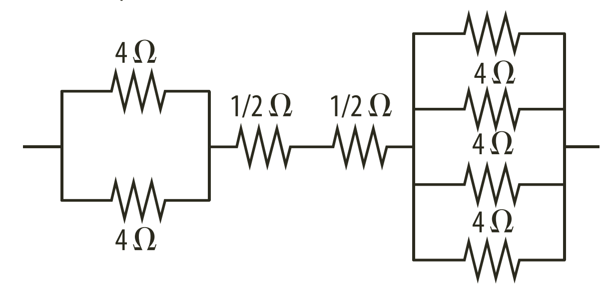


20 **Si R vale 100 Ω y r vale 1 Ω, ¿cuál será la intensidad de corriente que circula cuando ε vale 12 V?**

21 **En el circuito mostrado en la figura, calcula la corriente total que suministra la fuente si $R_1 = 3\Omega$, $R_2 = 6\ \Omega$, $R_3 = 2\ \Omega$, $R_4 = 4\ \Omega$, $r = 1\ \Omega$ y $\varepsilon = 9$ V.**



22 **Calcula la resistencia equivalente del circuito entre *A* y *B*.**



23 **Por una resistencia de 10 ohmios pasa una corriente de 5 amperios durante 4 minutos. ¿Cuántos electrones pasan durante este tiempo? Considera la carga del electrón como $1,6 \cdot 10^{-19}$ C.**

24 **Halla la resistencia equivalente del circuito mostrado en la figura.**

25 **Un circuito está formado por tres resistencias conectadas en paralelo. Si por R_1 circula una corriente de 15 *A*, ¿qué corriente circula por R_3?**

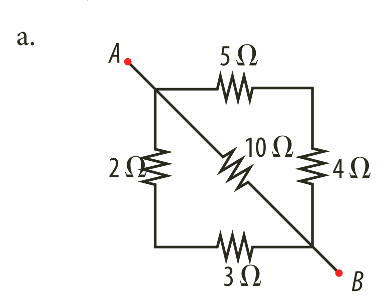


Problemas de profundización

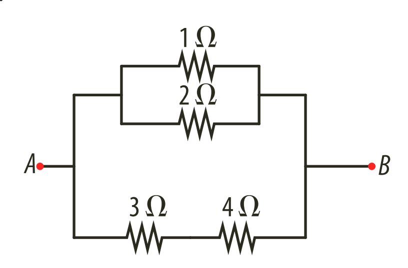
26 **Se tienen dos alambres del mismo material y de la misma longitud, pero uno de ellos tiene el cuádruple de área de la sección que el otro. Se mide la resistencia del más delgado y se obtiene un valor R_1. Expresa en función de R_1 la resistencia que se obtiene si se mide la resistencia de la cuarta parte del conductor más grueso.**

27 **Calcula la resistencia equivalente entre los puntos *A* y *B*.**

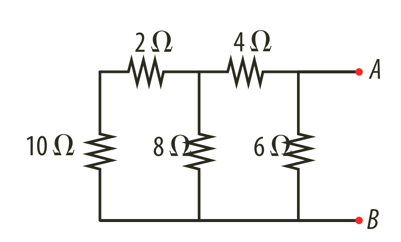
a.



b.



c.



28 **Un alambre de cobre de 2 mm² de sección transversal está empotrado en la pared de una casa y se desconoce su longitud. Si se sabe que su resistencia a 20 °C es de 28 mΩ, ¿cuál es su longitud?**

29 **Entre los extremos de un conjunto de tres resistencias R_1, R_2 y R_3, conectadas en serie, hay aplicada una diferencia de potencial V.**

Si $R_1 > R_2 > R_3$.

a. ¿Qué relación existe entre la corriente que circula por cada una de ellas?

b. ¿Qué relación existe entre el voltaje aplicado a cada una de ellas?

30 **Comprueba que si se conectan en serie *N* resistores de resistencia *R* cada uno, la resistencia equivalente es $N \times R$.**

31 **Demuestra que si se conecta en paralelo *N* resistores idénticos de resistencia *R* cada uno, la resistencia equivalente es R/N.**

Sugerencia: Supón que $R_1 < R_2$ y muestra que la resistencia equivalente puede ser expresada como R_1 multiplicada por un factor que es siempre menor que uno. El resultado hallado es general.

La resistencia equivalente de varias resistencias puestas en paralelo es siempre menor que la menor de todas las resistencias que lo componen.

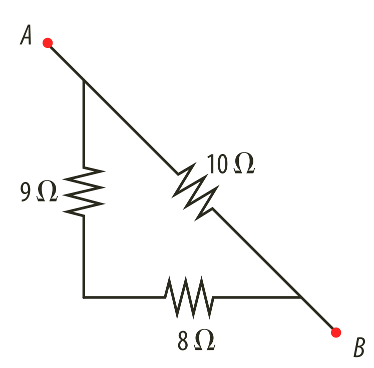
32 **Responde. ¿Cuál es la corriente que circula por los dedos que es cercana a los 600 Ω cada uno aproximadamente, cuando toca los extremos de una pila de 6 V?**

33 **Para el arreglo de resistencias de la figura determina:**

a. La resistencia equivalente.

b. La corriente que circula por la combinación de resistencias si el voltaje entre los puntos *A* y *B* es de 15 V.

c. La corriente que circula por la resistencia de 10 Ω.



34 **Se desea fabricar una resistencia de 1.500 W con alambre de cobre y aluminio. Si el diámetro de ambos es de 0,5 mm, ¿cuántos metros de cada material se debe utilizar?**

35 **En un concierto de rock se debe ubicar en una mejor posición un parlante para que la acústica del recinto sea la adecuada. El ingeniero de sonido ha decidido que para reubicar el parlante necesita 50 m de cable de cobre. Determina de qué diámetro debe ser el cable para que su resistencia se ubique por debajo de lo permitido que es de 0,2 V como lo indica su fabricante.**

Actividades

Verifica conceptos

1 **Escribe V, si la afirmación es verdadera o F, si es falsa. Justifica tu respuesta.**

- [ ] Los focos de mayor potencia tienen mayor resistencia eléctrica.
- [ ] La potencia consumida por una resistencia se mide en kilovatios-hora.
- [ ] Un conductor sometido a una diferencia de potencial se calienta.
- [ ] La resistencia eléctrica origina caídas de potencial o de tensión eléctrica.
- [ ] La energía eléctrica no se puede transformar en energía calorífica.
- [ ] La diferencia de potencial utilizada en los hogares es normalmente 110 V.
- [ ] El ohmímetro es un instrumento que se utiliza para medir resistencias.
- [ ] Los semiconductores son aquellos materiales que tienen una resistividad con valor intermedio entre los conductores y los aislantes.

2 **Relaciona cada ley con su definición.**

a. Ley de Ohm.

b. Ley de Joule.

c. Ley de nodos.

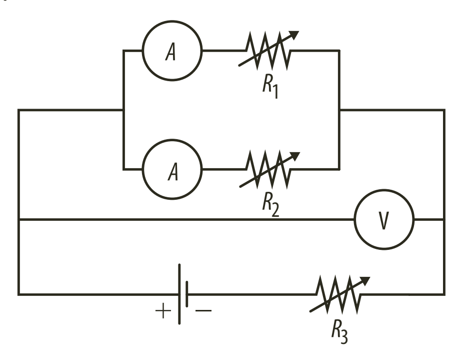
d. Ley de mallas.

- [ ] La suma de todas las intensidades de corriente que entran es igual a la suma de todas las intensidades de corriente que salen.
- [ ] La energía disipada es directamente proporcional a la carga eléctrica y a la diferencia de potencial.
- [ ] La suma de las fuentes de fem es igual a la suma de los voltajes o tensiones en cada resistencia.
- [ ] La intensidad de corriente eléctrica que circula en un cuerpo es directamente proporcional a la diferencia de potencia e inversamente proporcional a su resistencia.



Analiza y resuelve

3 **En el siguiente circuito las resistencias son variables.**

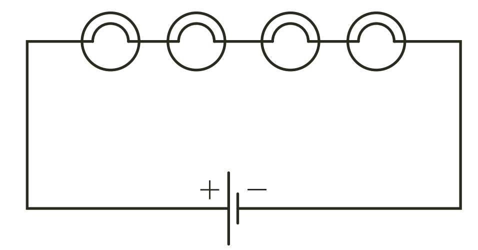


a. Indica si la corriente que marca cada amperímetro aumenta o disminuye cuando:
- Se aumenta el valor de la resistencia R_1.
- Se aumenta el valor de la resistencia R_2.
- Se disminuye el valor de la resistencia R_3.

b. Indica si el voltaje que marca el voltímetro aumenta o disminuye cuando:
- Se disminuye el valor de la resistencia R_1.
- Se disminuye el valor de la resistencia R_2.
- Se aumenta el valor de la resistencia R_3.

c. Determina las variaciones que se producen en las lecturas obtenidas por el voltímetro y por cada amperímetro cuando sustituimos la pila por otra de mayor fuerza electromotriz.

4 **Cuatro focos iguales, de 10 Ω de resistencia cada uno, se conectan en serie a una pila de 9 V.**



a. ¿Cuál es el valor de la resistencia equivalente?

b. ¿Cuál es el valor de la corriente que circula por cada foco?

c. ¿Cuál es el valor de la diferencia de potencial a la que está sometido?

5 **Explica para qué sirve la solapa metálica de algunos enchufes y el tercer agujero en el tomacorriente.**



Problemas básicos

6 **Por una batería pasa una corriente de 3 mA y la diferencia de potencial entre sus terminales es de 9 V.**

a. ¿Cuál es la potencia cedida por la batería?

b. ¿En cuánto aumenta la energía de cada culombio de carga que la atraviesa?

c. ¿Qué energía recibe cada electrón que la atraviesa?

7 **Por un alambre metálico circula una corriente de 2 A.**

a. ¿Qué cantidad de carga atraviesa una sección transversal en 1 minuto?

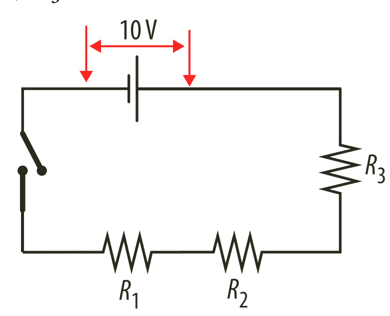
b. ¿Cuántos electrones pasan en ese intervalo de tiempo?

8 **Por una bombilla conectada a 230 V pasa una intensidad de corriente de 0,1 A. Halla:**

a. La resistencia que tiene la bombilla.

b. La carga eléctrica que circula por la bombilla en 30 minutos.

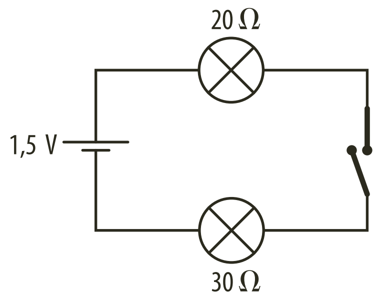
9 **En el circuito mostrado en la figura, $R_1 = 3\ \Omega$, $R_2 = 5\ \Omega$ y $R_3 = 15\ \Omega$.**



a. ¿Cuál es la resistencia equivalente del circuito?

b. ¿Cuál es la diferencia de potencial en cada resistencia?

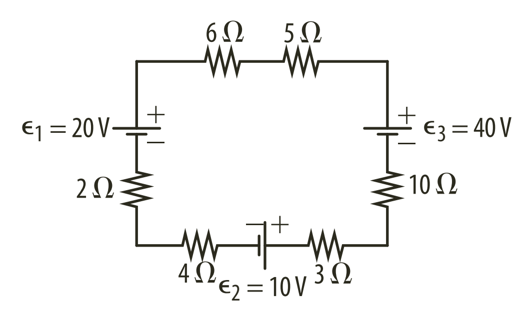
10 **Calcula la intensidad de corriente que circula por el circuito.**



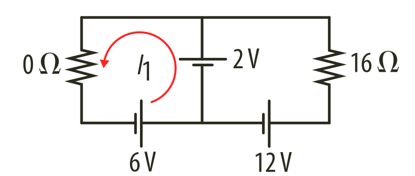


Problemas de profundización

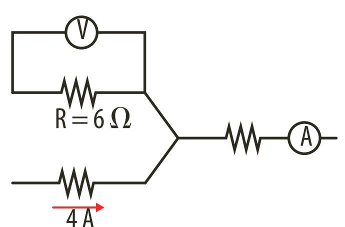
11 **Calcula la intensidad de corriente que circula por el circuito de una sola malla.**



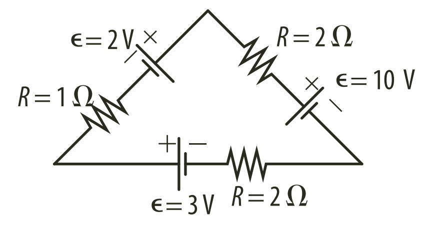
12 **Calcula la corriente del circuito mostrado en la figura.**



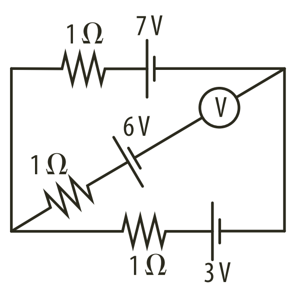
13 **En la figura la lectura de un voltímetro ideal es de 18 V. Calcula la lectura del amperímetro ideal.**



14 **Calcula la intensidad de corriente que circula por el circuito y la potencia disipada por la resistencia de 2 Ω. Considera las baterías ideales.**



15 **Calcula la lectura del voltímetro ideal en la figura.**



Ley de Ohm

Cuando un conductor se somete a un voltaje, circula por él una corriente eléctrica. La corriente es directamente proporcional al voltaje. Para un conductor en el cual se cumple que el voltaje *(V)*, la resistencia *(R)* y la corriente *(i)* se relacionan mediante la expresión $V = i \cdot R$.

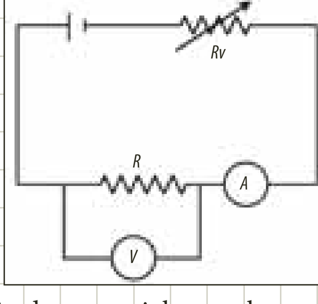
En esta práctica de laboratorio se desea encontrar experimentalmente la relación entre el voltaje y la corriente eléctrica en un circuito eléctrico sencillo.

Conocimientos previos

Circuitos, corriente, voltaje y resistencia.

Materiales

- Fuente
- Voltímetro
- Amperímetro
- Resistencia
- Resistencia variable (reóstato) o resistencias de diferentes valores

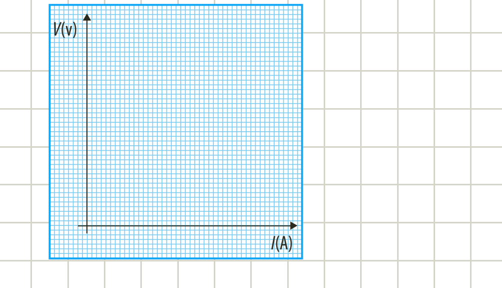


Procedimiento

1. Construye el circuito de la figura. En él están representados una fuente, un elemento al que llamamos resistencia variable o reóstato representado por *Rv*, una resistencia *R*, un voltímetro, un amperímetro. La resistencia variable tiene como finalidad variar la diferencia de potencial, a la que está sometida la resistencia *R*. Si no cuentas con un reóstato, puedes utilizar diferentes resistencias para variar la corriente que circula por la resistencia *R*. Es recomendable que únicamente mantengas cerrado el circuito mientras tomas las medidas, de esta manera evitas que se calienten las resistencias.
2. Para medir la diferencia de potencial entre dos puntos, conecta cada terminal del voltímetro a cada uno de los puntos entre los cuales deseas medir el voltaje. Comprueba con el voltímetro que dos puntos cualquiera de un mismo cable conductor están a la misma diferencia de potencial.
3. Para medir la corriente, se intercala el amperímetro en el circuito de tal manera que por él circule la corriente que se desea medir. Mide la corriente que circula por la resistencia *R*.
4. Mide la diferencia de potencial entre los extremos de la resistencia *R*. Registra los valores de la corriente y el voltaje en una tabla como la siguiente.

V (V)	*i* (A)

5. Varía la resistencia *Rv*, para obtener distintos valores del voltaje en la resistencia fija. A cada diferencia de potencial corresponde un valor de la corriente que circula por la resistencia *R*, registra los datos en la tabla.
6. Representa los valores obtenidos en el plano cartesiano. Asigna el eje horizontal a la corriente y el eje vertical al voltaje.
7. Determina la pendiente de la grafica.



Análisis de resultados

1. ¿Qué sucede con la corriente que circula por la resistencia cuando duplicas el voltaje aplicado?
2. ¿Qué significado tiene la pendiente de la recta obtenida? ¿Cuáles son las unidades?
3. ¿Cuál es el valor de la resistencia *R*?



Circuito en serie

La mayoría de los circuitos eléctricos están formados por varios dispositivos que consumen la energía provista por una o varias fuentes de voltaje. Si bien, el diseño de los circuitos, pueden ser variados y se conectan de dos formas características: en **serie** y en **paralelo**.

Cuando los dispositivos están conectados en serie, existe un único camino por el que circula la corriente. En la siguiente práctica se desea determinar si la suma de los voltajes a través de cada bombillo es igual al voltaje de la fuente cuando el circuito está conectado en serie.

Conocimientos previos

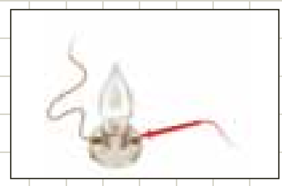
Corriente, resistencia, voltaje y manejo de voltímetro.

Materiales

- Dos pilas de 1,5 V
- Cables de conexión
- Tres bombillos para linterna
- Voltímetro
- Tres portalámparas
- Amperímetro

Procedimiento

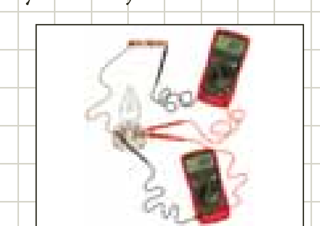
1. Ubica un bombillo en el portalámpara y conecta en un extremo un cable de conexión y en el otro una terminal del amperímetro.



2. Asocia las pilas con cinta y conéctalas al bombillo y al amperímetro.



3. Conecta el voltímetro. Determina el valor de la corriente y el voltaje en el circuito.



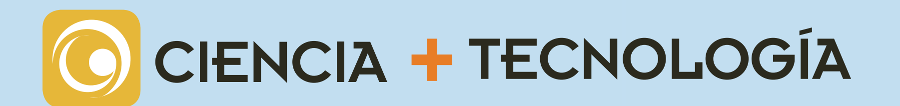
4. Determina la resistencia del bombillo, remplazando los valores de i y V en la siguiente ecuación: $R \frac{V}{i}$
5. Escribe los valores obtenidos en la siguiente tabla de registro.

R (Ω)	
V_1 (V)	
V_2 (V)	
V_3 (V)	
$V_1 + V_2 + V_3$	
V (pilas)	

6. Conecta los tres bombillos en serie.
7. Ubica el voltímetro en el primer bombillo y determina su valor. Regístralo en la tabla.
8. Cambia el voltímetro al segundo y tercer bombillo. Determina el voltaje y registra los valores.
9. Suma los tres voltajes obtenidos.
10. Con la ayuda del voltímetro, determina el voltaje de las pilas sin que estén conectadas a los bombillos y registra su valor en la tabla.

Análisis de resultados

1. Calcula la resistencia equivalente.
2. Responde. ¿Cómo podemos explicar que el voltaje de la pila no sea igual a la suma de todos los voltajes?
3. Determina la corriente del circuito con el valor de la resistencia equivalente y el voltaje de las pilas. ¿Es igual esta corriente al valor obtenido en el paso 3? Justifica tu respuesta.



Domótica

La domótica es un conjunto de sistemas que permiten que una casa esté automatizada a partir de aplicaciones electromagnéticas y una gran red de comunicación. La domótica nace de la necesidad de generar espacios autosostenibles tras la crisis petrolera de los años setenta. Inicialmente aparecieron los edificios inteligentes, pero con el paso de los años, la tecnología se trasladó a los hogares. Es una nueva alternativa para ayudar en el cuidado de los recursos naturales.

Paneles solares que permiten suministrar la energía necesaria a la casa.

Control de calefacción por zonas dependiendo de las necesidades.

Robot de limpieza que funciona con autonomía en lugares sucios de la casa.

Luces que simulan presencia de personas en casa.

Detectores de movimiento.

Luces automáticas que funcionan cuando detectan presencia en la habitación.

Control automático de cortinas y persianas.

Gracias a sus conexiones inalámbricas como WiFi, GPRS, Bluetooth, infrarrojos entre otros se puede controlar la casa desde controles remotos.



El sistema permite controlar toda la casa desde el computador personal, que brinda toda la información sobre seguridad, temperatura, utilización de energía, iluminación, sonido y diferentes cámaras.



Cuando se está fuera de casa también se puede hacer un fácil control desde el celular.





UNIDAD 7

Electricidad y magnetismo

Temas de la unidad

1. Magnetismo
2. Inducción electromagnética



Para pensar…

Seguramente te resultan más familiares los fenómenos eléctricos que los magnéticos, ya que en algunas ocasiones has observado la electrización de tu cabello, los chasquidos que sientes al acercar tu mano a una pantalla de televisión encendida o los leves corrientazos al tocar ciertos objetos metálicos. Sin embargo, también estás familiarizado con algunas manifestaciones magnéticas, como la atracción de un objeto metálico por parte de un imán.

Sin embargo, estos fenómenos que inicialmente fueron estudiados por separado, han permitido determinar que la electricidad genera efectos magnéticos y que el magnetismo puede producir, a su vez, corrientes eléctricas; descubrimientos que en la actualidad han permitido un amplio desarrollo tecnológico de la sociedad.

En esta unidad estudiaremos las influencias mutuas de los fenómenos eléctricos y magnéticos, además de sus diferentes aplicaciones en el desarrollo de la sociedad.

Para responder…

- ¿Cómo diferencias un fenómeno eléctrico de uno magnético?
- ¿Conoces algún fenómeno eléctrico? Nómbralo.
- ¿Conoces algún fenómeno magnético? Nómbralo.

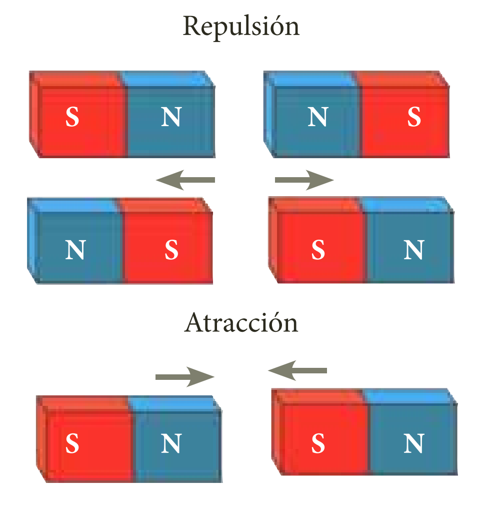
1. Magnetismo

1.1 Magnetismo

1.1.1 Magnetismo natural: los imanes

Los fenómenos magnéticos, como los eléctricos, se conocen desde la Antigüedad, sin embargo solo hasta el siglo XIX pudieron explicarse. No se sabe en qué momento se percibió por primera vez la existencia de los fenómenos magnéticos, aunque existe una referencia de hace 2.000 años sobre ciertas piedras que atraían metales. El nombre de magnetismo, proviene de Magnesia, una ciudad de la antigua Grecia en la que abundaba un mineral con propiedades magnéticas, material que en la actualidad se conoce con el nombre de magnetita.

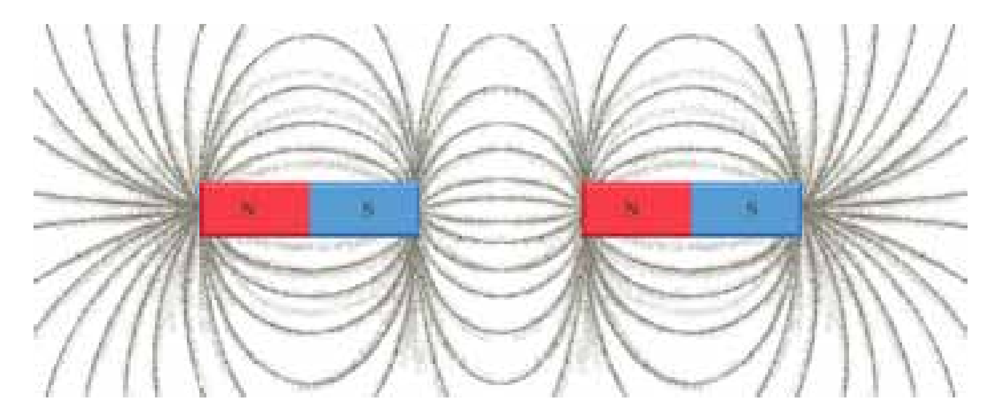
Un imán natural es un mineral metálico que tiene la propiedad de atraer a otros metales y se encuentra formado por elementos como el hierro, el cobalto y el níquel.



Todo imán tiene dos polos magnéticos: el **polo norte** y el **polo sur**, cuya interacción produce dos tipos de fuerza: fuerzas de repulsión y fuerzas de atracción.

- Las fuerzas de repulsión, se producen al interactuar polos del mismo tipo (sur y sur; norte y norte).
- Las fuerzas de atracción, se generan cuando interactúan polos de distinto tipo (sur y norte).

En la siguiente figura se puede observar el comportamiento de los polos del imán.



Este arreglo de las limaduras permite demostrar la semejanza entre las líneas de fuerza de un dipolo eléctrico y el comportamiento de cargas eléctricas con los polos de un imán. Una gran diferencia entre ellos es que se puede obtener un solo tipo de carga aislada: positiva o negativa, pero jamás podrá obtener un solo polo, es decir, no existen los monopolos magnéticos.

La comparación con las cargas eléctricas puede extenderse a la intensidad de la fuerza y su dependencia con la distancia, siendo la fuerza de repulsión o atracción entre dos polos magnéticos inversamente proporcional al cuadrado de la distancia existente entre ellos.

1.1.2 Magnetismo artificial: la imantación

En la exploración magnética, no todos los materiales son atraídos por un imán. Esta atracción suele presentarse con mayor fuerza en el hierro, el níquel y el cobalto, por lo cual a estos materiales se les conoce con el nombre de ferromagnéticos, palabra proveniente del latín *ferrum* que significa hierro.

Así mismo existen otros materiales, denominados diamagnéticos, como el plástico, la madera, el aluminio, el plomo y el cobre en los cuales la atracción magnética no es significativa.

Pero ¿qué tienen en especial los materiales ferromagnéticos para ser atraídos fuertemente por un imán? Las propiedades magnéticas están relacionadas con su estructura atómica. El movimiento de los electrones permite que cada átomo se comporte como un imán, de esta manera todos los átomos se alinean paralelamente entre sí distribuyéndose en grupos con la misma orientación, denominados dominios magnéticos.

Los objetos de material ferromagnético pueden transformarse en imanes bajo un proceso denominado **imantación**, el cual consiste en dejar durante cierto tiempo el material en contacto con un imán y así producir un imán artificial. Esta imantación puede ser temporal o permanente.

- Por ejemplo, si frotamos un clip metálico o un clavo con un imán, el clip se convertirá en un imán temporal y podrá atraer otros objetos de hierro. Sin embargo, después de cierto tiempo este “magnetismo” desaparece.
- En las industrias se emplean otros métodos más complicados para fabricar los imanes permanentes, cuya capacidad de atraer el hierro se conserva y no se reduce al pasar el tiempo. Estos imanes suelen ser utilizados en los laboratorios.

1.2 Campo magnético

Hemos mencionado que la fuerza con la cual se atraen o se repelen dos imanes disminuye al aumentar la distancia entre ellos, y que lo mismo sucede con la fuerza que un imán ejerce sobre un objeto de material ferromagnético. Sin embargo, si el imán y el objeto se encuentran a una distancia relativamente grande, el objeto no experimenta ningún tipo de atracción. En este caso, se dice que el objeto está fuera del campo magnético generado por el imán.

Definición

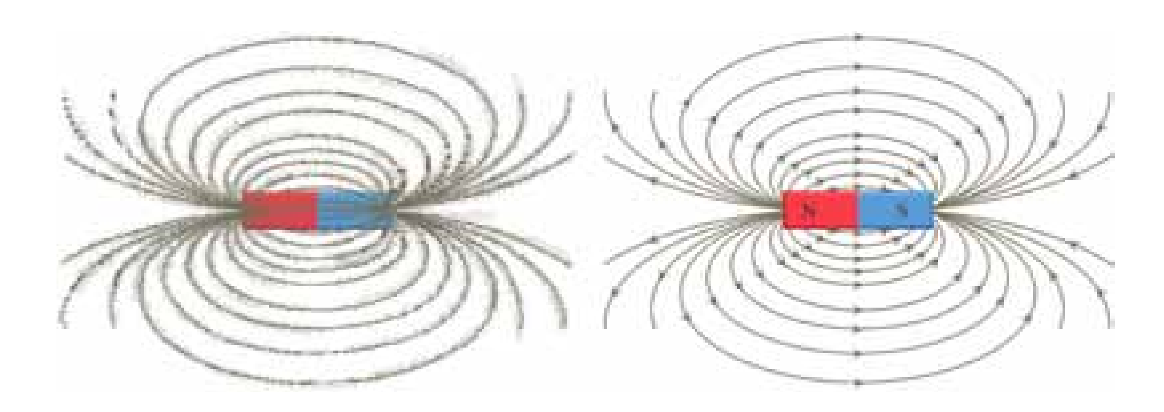
Se denomina campo magnético (B) a la región del espacio en la cual se manifiestan las fuerzas magnéticas producidas por el imán.

La intensidad del campo magnético se mide en una unidad llamada tesla (T), en honor de Nikola Tesla, científico que realizó trabajos relacionados con la electricidad y el magnetismo. Aunque también realizó una experiencia en la cual suele emplearse otra unidad denominada gauss (G).

Para poder visualizar el campo magnético, Michael Faraday (1791-1887) esparció limaduras de hierro sobre un papel ubicado encima de un imán. Faraday observó que las limaduras se situaban en líneas cerradas, es decir, líneas que parten de un polo del imán y que llegan al otro polo y determinó que dichas líneas no se cortan.

En un imán, estas líneas se denominan líneas de campo y por convenio, se dice que salen del polo norte e ingresan al polo sur.

En la siguiente figura se representan las líneas de campo de un imán recto.



Estas líneas de campo presentan ciertas características.

- En el exterior del imán, cada línea se orienta desde el polo norte al polo sur.
- Las líneas son cerradas, es decir, no se interrumpen en la superficie del imán.
- El vector de campo magnético en cada punto del espacio es tangente a la línea de campo que pasa por ese punto.
- La cantidad de líneas por unidad de área en la vecindad de un punto es proporcional a la intensidad del campo en dicho punto.
- Las líneas nunca se intersecan ni se cruzan en ningún punto del espacio.

1.2.1 Fuerza magnética sobre una carga eléctrica

Cuando una carga eléctrica se encuentra en un campo magnético y se desplaza dentro de él, experimenta una fuerza debida a la acción del campo. Esta fuerza magnética que experimenta una carga cuando se encuentra en un campo magnético es:

- Directamente proporcional al valor de la carga q, cuanto mayor sea esta, mayor será la fuerza que actuará sobre la carga.
- Directamente proporcional a la velocidad v de la carga, de tal forma que si la carga está en reposo el campo no actúa sobre ella.
- Directamente proporcional al valor del campo magnético en el cual se encuentra inmersa la carga.
- Directamente proporcional al seno del ángulo a que se forma entre la dirección del campo magnético y la dirección de la velocidad. Si el ángulo es de 0° o de 180° el campo no actúa sobre la carga, ya que este sólo actúa sobre la componente perpendicular de la velocidad con relación a la dirección del campo magnético.

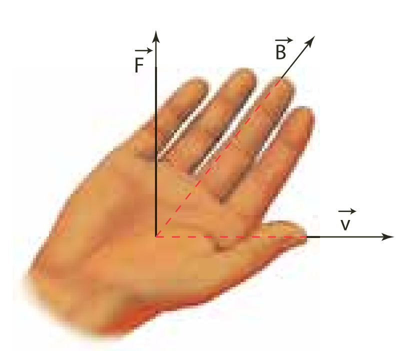
De esta manera la fuerza queda expresada como:

$$F = q \cdot v \cdot B \cdot \text{sen}\,\alpha$$

Para determinar la dirección de la fuerza se debe tener en cuenta que:

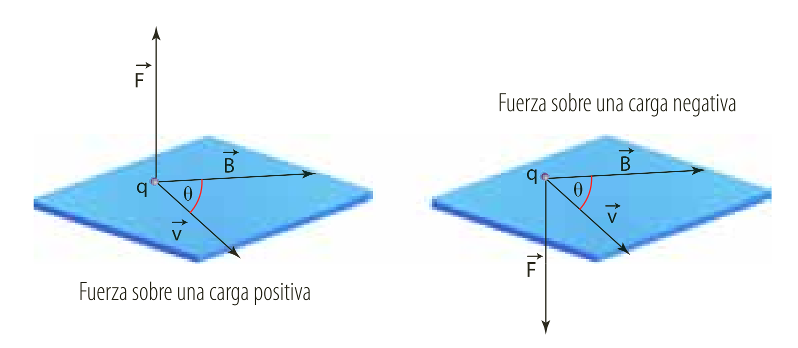
- La dirección de la fuerza siempre es perpendicular al plano que forman los vectores de la velocidad v y el campo magnético B.
- La dirección de la fuerza se puede hallar por medio de la regla de la mano derecha. De acuerdo con esta regla, para obtener el sentido de la fuerza magnética que actúa sobre una carga eléctrica positiva en movimiento, se procede de la manera que se describe en la siguiente página.

Ubica la mano derecha bien abierta como se indica en la figura, con el dedo pulgar dirigido hacia el vector $\vec{v}$ y los demás dedos orientados según el campo magnético $\vec{B}$.



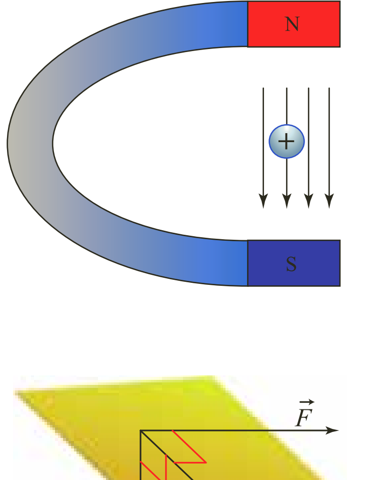
El sentido de $\vec{F}$ será aquel hacia donde quede rotada la palma de la mano, es decir, el sentido del movimiento que debería ser hecho para dar una palmada o un golpe con esta parte de la mano. Si la carga es negativa, se invierte el sentido de la fuerza.

En la siguiente figura se representan los vectores para una carga positiva y una carga negativa.



EJEMPLOS

1. Un ion positivo de carga igual a la de dos protones, es decir, de $3{,}2 \cdot 10^{-19}$ C se encuentra en un campo magnético entre los dos polos de un imán de herradura, tal como lo muestra la figura. Si el campo magnético es de 0,0007 T y la velocidad de la partícula es perpendicular al campo, calcular la fuerza que experimenta dicha carga.



Solución:

Hallemos primero el valor de F y luego su dirección:

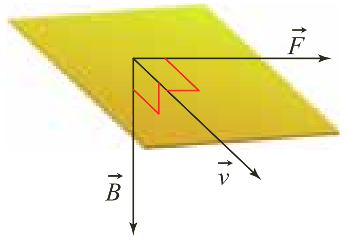
$F = q \cdot v \cdot B \cdot \text{sen}\ \alpha$

$F = 3{,}32 \times 10^{-19}\ \text{C} \cdot 10^5\ \text{m/s} \cdot 7 \times 10^{-4}\ \text{T} \cdot \text{sen}\ 90°$ *Al remplazar*

$F = 23{,}24 \times 10^{-18}\ \text{N}$ *Al calcular*

Para hallar la dirección orientamos el dedo pulgar saliendo del plano y perpendicular a este coincidiendo con $\vec{v}$; los otros dedos orientados hacia abajo coincidiendo con $\vec{B}$, de tal forma que la palma de la mano se orienta hacia la derecha.

La fuerza $\vec{F}$ es de $23{,}24 \times 10^{-18}$ N y tiene una dirección de 0° con respecto a la horizontal.



EJEMPLOS

2. Un ion negativo viaja a 10^5 m/s y entra en una región donde hay un campo magnético *B* de 0,02 T, cuya fuerza $\vec{F}$ es de $0{,}23 \cdot 10^{-15}$ N vertical y hacia abajo (270° con respecto a la horizontal).
Si la dirección de $\vec{B}$ es perpendicular al plano y entrando en él, determinar:

a. La dirección de $\vec{v}$

b. El valor de la carga.

Solución

a. Hallemos la dirección de la velocidad. Para ello, debemos ubicar la palma de la mano hacia abajo y los dedos dirigidos perpendicularmente al plano. Por lo tanto, el pulgar se dirige hacia la izquierda y como es un ion negativo, entonces se dirige a la derecha. Como $\vec{B}$ y $\vec{v}$ son perpendiculares la trayectoria del ion es circular.

b. El valor de la carga se define a partir de la ecuación de fuerza magnética sobre una carga eléctrica, por lo tanto:

$F = q \cdot v \cdot B \cdot \text{sen}\,\alpha$

$0{,}23 \times 10^{-15}\text{ N} = q \times 10^5\text{ m/s} \cdot 0{,}02\text{ T} \cdot \text{sen } 90°$

$q = 1{,}15 \times 10^{-19}\text{ C}$ *Al despejar q y calcular*

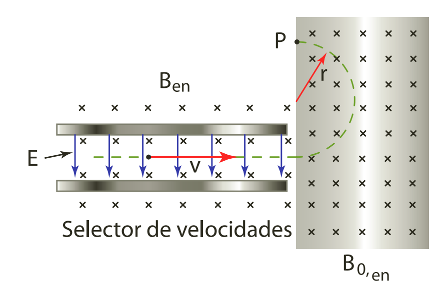


Figura 1. Espectrógrafo de masas, que funciona mediante un campo eléctrico que genera la misma velocidad en todos los isótopos ionizados, los que por tener diferentes masas, al entrar en el campo magnético, describen trayectorias de radios diferentes.

1.2.2 Espectrógrafo de masas

El espectrógrafo de masas es un dispositivo que se utiliza para separar los diferentes isótopos que contiene un elemento químico en su forma natural, ya que no es posible separarlos con procedimientos químicos. Mediante un campo eléctrico, se produce un chorro de isótopos ionizados que ingresan con igual velocidad en un campo magnético uniforme.

Como tienen diferentes masas y diferentes cargas, los iones describen trayectorias de radio diferente y al chocar contra una placa fotográfica se puede establecer el porcentaje de isótopos en la mezcla inicial, como se observa en la figura 1.

Como la fuerza siempre es perpendicular a $\vec{v}$ no realiza trabajo sobre los iones, sino que se les proporciona una aceleración centrípeta (a_c), necesaria para mantener la trayectoria circular, así que:

$$a_c = \frac{v^2}{r} \quad \textit{Definición de } a_c$$

$$F = m \cdot a_c \quad \textit{Segunda ley de Newton}$$

$$F = m \cdot \frac{v^2}{r} \quad \textit{Al remplazar } a_c$$

Como $F = q \cdot v \cdot B \cdot \text{sen}\,\alpha$, entonces:

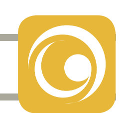
$$m \cdot \frac{v^2}{r} = q \cdot v \cdot B \cdot 1 \quad \textit{Al igualar las dos ecuaciones}$$

Por tanto,

$$r = \frac{m \cdot v^2}{q \cdot v \cdot B}$$

Al simplificar la ecuación, obtenemos una expresión para el radio de la circunferencia que describe una partícula cuya velocidad $\vec{v}$ es perpendicular al campo $\vec{B}$:

$$r = \frac{m \cdot v}{q \cdot B}$$



1.2.3 Fuerzas sobre corrientes

El campo magnético formado por el enfrentamiento de los polos de un imán de herradura, se considera un campo magnético constante. Si colocamos en este campo $\vec{B}$, un alambre por el cual circula una corriente i, este experimenta una fuerza magnética perpendicular al plano que forman el campo magnético y el alambre.

Para hallar la expresión de esta fuerza, consideremos que el conductor por el cual fluye corriente es de longitud l, cuyas cargas lo recorren en un tiempo t. Por lo cual, su velocidad es:

$$v = \frac{l}{t}$$ *Definición de velocidad*

$$F = \frac{q \cdot l \cdot B \cdot \text{sen}\,\alpha}{t}$$ *Al remplazar l en la ecuación de fuerza magnética*

$$i = \frac{q}{t}$$ *Definición de corriente eléctrica*

Por tanto, la fuerza magnética que experimenta un conductor por el cual fluye corriente eléctrica y se encuentra en un campo magnético $\vec{B}$ es:

$$F = i \cdot l \cdot B \cdot \text{sen}\,\alpha$$

La dirección se obtiene con la regla de la mano derecha, haciendo coincidir la dirección convencional de la corriente con la del pulgar, los demás dedos con la dirección del campo magnético y la palma de la mano con la dirección de la fuerza.

EJERCICIO

Una corriente eléctrica de 2,5 A recorre una espira cuadrada de arista $l = 10$ cm, y su plano es paralelo a un campo magnético $B = 0,02$ T. ¿Cuál es el valor de la fuerza que actúa sobre los lados paralelos y perpendiculares a B?

EJEMPLO

Un alambre recto de 0,1 m de largo conduce una corriente de 2 A. El alambre se introduce en un campo magnético *B* de 0,01 T, y la dirección del campo es horizontal y positiva (hacia la derecha). Hallar la fuerza y su dirección si:

a. El alambre y el campo forman un ángulo de 90°.

b. El alambre y el campo son paralelos.

c. El alambre y el campo forman un ángulo de 30°.

Solución:

a. A partir de la fuerza magnética relacionada con la corriente eléctrica tenemos que:

$F = i \cdot l \cdot B \cdot \text{sen}\,\alpha$

$F = 2\text{ A} \cdot 0,1\text{ m} \cdot 0,01\text{ T} \cdot \text{sen } 90°$ *Al remplazar*

$F = 0,002\text{ N}$ *Al calcular*

La dirección se halla al direccionar los dedos hacia la derecha, el pulgar hacia arriba y la palma señala la dirección de la fuerza como perpendicular al plano e ingresando a este y con un valor igual a 0,002 N.

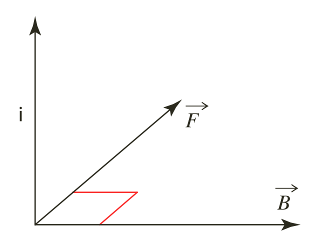
b. Si i y $\vec{B}$ son paralelos, el ángulo formado entre ellos es 0° o 180°. Como el seno en ambos casos es cero, la fuerza magnética es cero.

c. Si i y $\vec{B}$ forma un ángulo de 30°, entonces:

$F = 2\text{ A} \cdot 0,1\text{ m} \cdot 0,01\text{ T} \cdot \text{sen } 30°$ *Al remplazar*

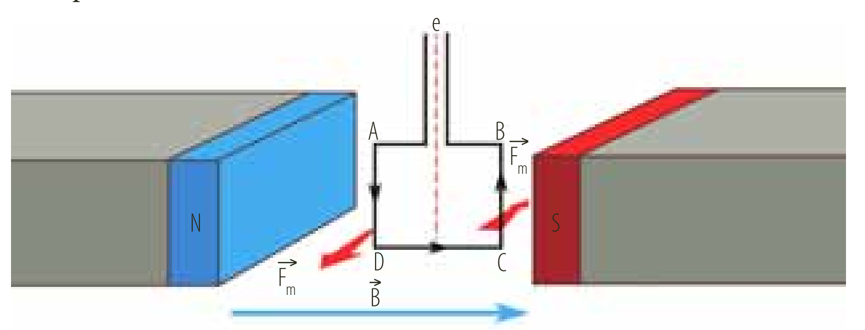
$F = 0,001\text{ N}$ *Al calcular*

Como el campo actúa sobre la componente perpendicular de i con respecto al campo entonces, la fuerza es perpendicular al plano e ingresa a esta con un valor de 0,001 N. En la siguiente figura se muestran los vectores para los numerales a y c.



1.2.4 Acción de un campo magnético sobre un circuito

Un circuito rectangular como el que se muestra en la siguiente figura consiste en un conductor, denominado espira, que puede girar libremente alrededor del eje *e*, si se encuentra en el campo magnético generado por los dos imanes.

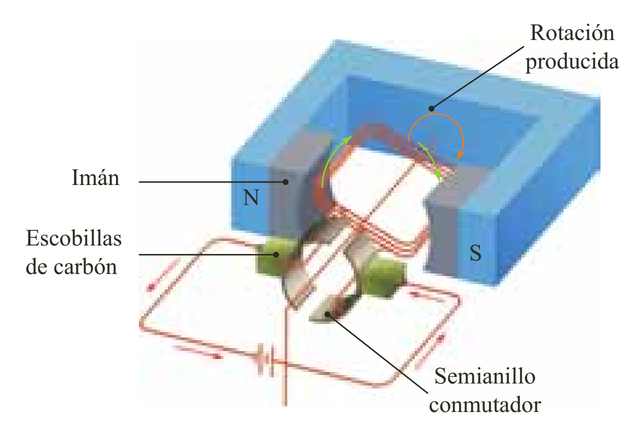


La corriente que fluye desde *A* hasta *D* genera una fuerza magnética perpendicular al plano y que sobresale de él. Por otra parte, la corriente que fluye de *D* a *C* no genera fuerza y la corriente que fluye desde *C* hasta *B* provoca una fuerza perpendicular al plano e ingresa en él. Por tanto, las fuerzas forman una dupla y generan un giro alrededor de *e* en sentido positivo.

1.2.5 El motor eléctrico

Una de las aplicaciones más útiles de la fuerza experimentada por un conductor eléctrico en presencia de un campo magnético perpendicular a él es el motor eléctrico. El funcionamiento del motor eléctrico se basa en la rotación de una serie de espiras conductoras por las cuales circula una corriente, cuando se encuentran al interior del campo magnético creado por un imán. Un motor necesita de una fuente de poder, que puede ser una pila, la cual produce una corriente que siempre tiene el mismo sentido.

Una variación de este tipo de motor es aquel en el que el movimiento rotatorio de la espira se produce a través de una fuerza externa. En este caso se genera una corriente de intensidad variable, pero cuyo sentido siempre es el mismo. En la siguiente figura se representa un motor eléctrico.



Al pasar la corriente por la espira, como esta se encuentra ubicada en un campo magnético (el creado por los imanes fijos), comienza a girar produciendo así su movimiento a partir de dicha corriente eléctrica.

1.2.6 Efecto Hall

Cuando un alambre conductor por el cual fluye corriente se encuentra en un campo magnético, el campo ejerce una fuerza lateral sobre las cargas en movimiento. Si observamos la figura 2a y aplicamos la regla de la mano derecha, podemos concluir que los electrones experimentan una fuerza magnética hacia abajo que los acerca hacia la superficie *G* y los aleja de la *C*, creándose una diferencia de potencial que crece hasta que el campo eléctrico (*E*), ejerce una fuerza igual sobre las cargas en movimiento y opuesta a la ejercida por el campo magnético *B*.

A este efecto se le denomina Efecto Hall ya que fue Edwin Herbert Hall quien lo descubrió. La figura 2b ilustra el efecto Hall para una carga positiva. Con este experimento se comprobó que en los metales las cargas en movimiento son los electrones. Actualmente se usa para determinar el tipo de carga que se mueve en los semiconductores.

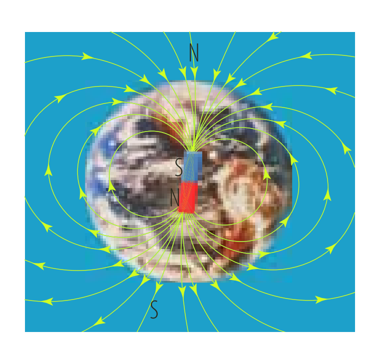
Figura 2. Efecto Hall, con el que se demostró que en los sólidos las cargas en movimiento, son los electrones.

1.3 Fuentes de campos magnéticos

1.3.1 El campo magnético terrestre

La primera aplicación práctica del magnetismo la constituyó un imán empleado en la navegación. Las referencias de la utilización de imanes en la navegación marítima se remontan al siglo XII, cuando se observó que uno de los polos de un imán se orientaba siempre hacia el norte geográfico. Por tal razón, a partir de allí se comenzó a emplear imanes para la orientación geográfica.

El físico y médico inglés William Gilbert, basándose en sus estudios de magnetismo, fue la primera persona en sugerir que la Tierra actuaba como un gran imán, cuyo campo terrestre es tal que las líneas de campo salen aproximadamente del polo sur y circundan la Tierra siguiendo los meridianos hasta entrar por el polo norte. Por esta razón, es que una brújula señala aproximadamente el norte, debido a la acción del campo magnético terrestre.



Un fenómeno sorprendente que ocurre en el campo magnético de la Tierra es que sus polos magnéticos se han invertido varias veces durante el transcurso de la existencia del planeta. Este fenómeno de inversión de los polos se ha presentado a intervalos de miles de años. En la actualidad, el polo norte magnético se encuentra próximo al polo sur geográfico y el polo sur magnético se ubica cerca al polo norte geográfico.

Una de las propiedades que permite orientarse a las aves migratorias, es la capacidad que tienen para detectar la intensidad y la dirección del campo magnético terrestre (figura 3). Dicha capacidad se explicaría por dos mecanismos complementarios. Uno está relacionado con la acción de la luz. Las moléculas de rodopsina que se encuentran en las células de la retina del ojo, absorben fotones y se convierten en pequeños imanes transitorios, alineándose en la dirección del campo. Este mecanismo se complementaría con el efecto producido por los cristales de magnetita presentes en el cráneo de las aves.



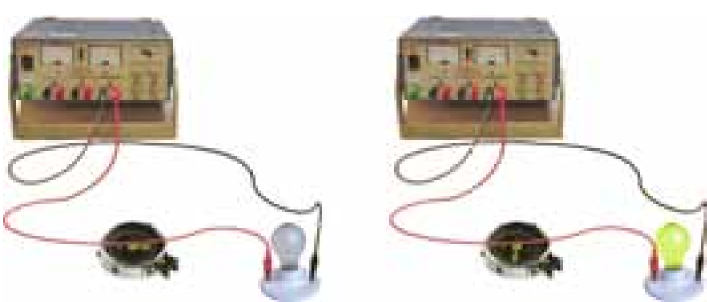
Figura 3. Las aves migratorias se orientan gracias al campo magnético terrestre.

EJERCICIO

¿Qué demostró el físico Oersted con su experimento?

1.3.2 La experiencia de Oersted

En 1819, Cristian Oersted comprobó que la aguja de una brújula se desviaba en las proximidades de un hilo conductor por el que circulaba corriente eléctrica.

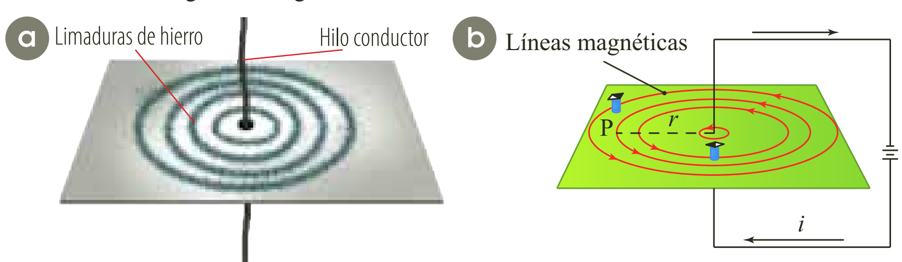


Oersted comprobó que al colocar la aguja de una brújula cerca de un cable conductor giraba bruscamente cuando se hacía pasar corriente a través del alambre al observar que la aguja se orientaba en dirección perpendicular al cable. Posteriormente comprobó que al invertir el sentido de la corriente la aguja giraba 180° y se colocaba otra vez en dirección perpendicular al cable, pero en sentido contrario al anterior.

Las experiencias de Oersted demuestran que las cargas eléctricas en movimiento generan un campo magnético, que es el causante de la desviación de la brújula; es decir, que una corriente eléctrica crea a su alrededor un campo magnético.

1.3.3 Campo magnético creado por un conductor rectilíneo

Toda corriente genera un campo magnético, efecto que se pone en manifiesto al observar la disposición que toma un conjunto de limaduras de hierro espolvoreadas sobre un papel perforado por un cable conductor, tal como se observa en la siguiente figura (a).



Si por este conductor rectilíneo circula una intensidad de corriente *i*, la intensidad del campo magnético producido sobre el punto P situado a una distancia r del conductor (figura b) viene dada por la ley de **Biot-Savart**.

Definición

La intensidad del campo magnético que una corriente rectilínea genera en un punto es directamente proporcional a la intensidad de esa corriente e inversamente proporcional a la distancia que separa el punto del conductor.

Esta ley se expresa como:

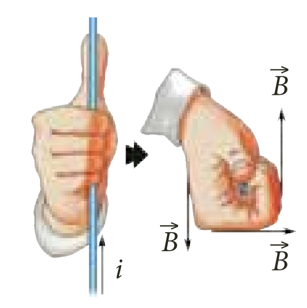
$$B = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{i}{r}$$

Donde μ_0 es la permeabilidad magnética del vacío, equivalente a:

$$4\pi \times 10^7 \ \mathrm{T \cdot m/A}.$$



La dirección del campo magnético se puede determinar aplicando la regla de la mano derecha, en donde, el dedo pulgar indica la dirección de la corriente eléctrica convencional y los demás dedos que envuelven al conductor indican la dirección del vector campo magnético.



EJEMPLO

Hallar el valor cuantitativo en un punto *P* de un campo magnético (*B*), inducido por un alambre muy largo por el cual circula una corriente de 40 A. El punto *P* está ubicado a 5 cm del alambre.

Solución:

En el punto *P* el valor del campo magnético es:

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{i}{r}$$

$$B = \frac{4\pi \times 10^{-7}\ \mathrm{T \cdot m/A}}{2\pi} \cdot \frac{40\ \mathrm{A}}{0{,}05\ \mathrm{m}}$$ *Al remplazar*

$B = 1{,}6 \times 10^{-4}$ T *Al calcular*

A 5 cm del alambre el campo magnético *B* tiene un valor de $1{,}6 \times 10^{-4}$ T.

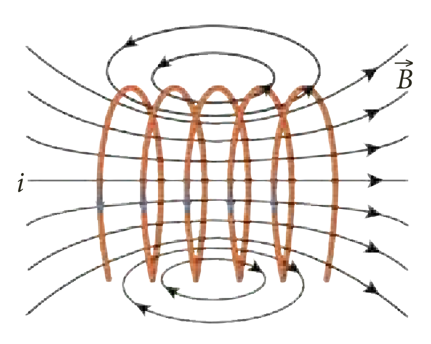


Figura 4. El campo magnético producido en el interior del solenoide, por la corriente que circula por él, es constante.

1.3.4 Campo magnético creado por un solenoide

Al observar el interior de un timbre eléctrico, de un transformador o de un motor eléctrico, es posible encontrar un alambre enrollado con un gran número de vueltas dispuestas una a continuación de otra y estrechamente unidas. Este conductor largo enrollado en forma de hélice se denomina solenoide o bobina.

Un solenoide tiene una particular característica, ya que cuando circula por él una corriente eléctrica, se produce en su interior un campo magnético cuya intensidad permanece constante y cuyas líneas de fuerza son paralelas, es decir, forman un campo magnético uniforme (figura 4).

El valor de la intensidad del campo magnético producido por un solenoide de *N* espiras, cuya longitud es *l*, y por el cual circula una intensidad de corriente *i*, está dado por la expresión:

$$B = \mu \cdot i \cdot n$$

siendo $n = \frac{N}{l}$

Por otra parte, el campo magnético en el centro de una espira del solenoide es inversamente proporcional al radio de la misma y directamente proporcional a la corriente que circula por ella (figura 5). El valor del campo magnético en el centro de una espira de radio *r* por la que circula una corriente *i* se expresa como:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot i}{2 \cdot r}$$

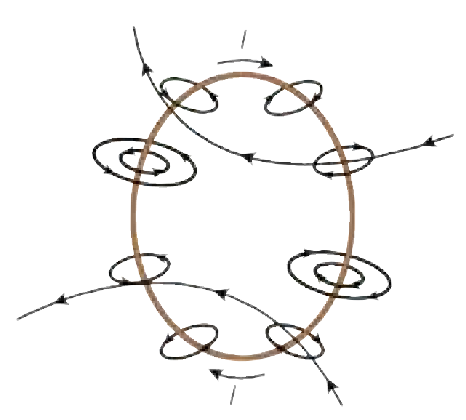


Figura 5. El campo magnético en el centro de una espira depende de su radio y de la intensidad de la corriente que circula por ella.

EJEMPLO

Una bobina de 600 vueltas, 6 cm de longitud y 2 cm de diámetro, crea en su interior un campo magnético cuando se hace pasar por ella una corriente. Si el campo magnético es de $5{,}26 \cdot 10^{-3}$ T, su dirección es horizontal positiva, hallar:

a. La intensidad de corriente que circula por la bobina y su dirección.

b. La variación del campo magnético al duplicar el número de espiras y mantener las otras variables constantes.

Solución:

a. Antes de hallar la intensidad de corriente, hallemos el valor de *n*.

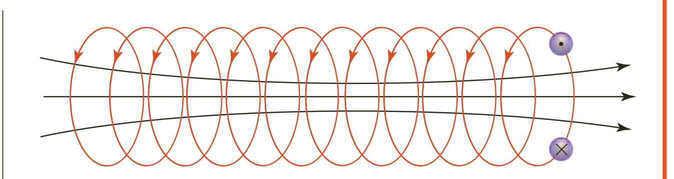
$$n = \frac{600 \text{ vueltas}}{0{,}06 \text{ m}} = 10.000 \text{ v/m}$$

$B = \mu \cdot i \cdot n$

$5{,}26 \times 10^{-3}\ \text{T} = 4\pi \times 10^{-7}\ \text{T} \cdot \text{m/A} \cdot i \cdot 10.000\ \text{v/m}$

$i = 0{,}42$ A *Al remplazar se despeja i*

La intensidad de corriente que pasa por la bobina es de 0,42 A y su dirección se ilustra en la siguiente gráfica.



b. Al duplicar el número de espiras, tenemos:

$$n = \frac{1.200 \text{ vueltas}}{0{,}06 \text{ m}} = 20.000 \text{ v/m}$$

Al remplazar en la ecuación del campo magnético:

$B = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}\ \text{T} \cdot \text{m/A} \cdot 0{,}42\ \text{A} \times 20.000\ \text{v/m}$

Al calcular:

$B = 10{,}52 \times 10^{-3}$ T

Al duplicar el número de espiras en la bobina se duplica el campo magnético formado dentro de ella a un valor de $10{,}52 \times 10^{-3}$ T.

1.3.5 Fuerza magnética entre dos conductores rectos

Si dos conductores eléctricos, próximos entre sí, portan corriente, experimentan una fuerza de atracción o repulsión debida a la interacción entre los campos magnéticos generados por las corrientes que circulan por ellos (figura 6).

Cuando las corrientes recorren los conductores en el mismo sentido estos se atraen, mientras se repelen si las corrientes tienen sentidos opuestos.

El campo magnético B_1, creado por un conductor largo y recto, de longitud l que portan una corriente i_1 a una distancia r de él, estará dado por la expresión:

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{i}{r}$$

Si un segundo conductor de la misma longitud, que porta una corriente i_2, es colocado a una distancia r y paralelo al conductor anterior, experimentará una fuerza magnética F dada por:

$$F = i_2 \cdot l \cdot B_1$$

o equivalente a:

$$F = \frac{\mu_0 \cdot i_1 \cdot i_2 \cdot l}{2\pi \cdot r}$$

Cuyos sentidos del campo magnético se identifican a través de la regla de la mano derecha.

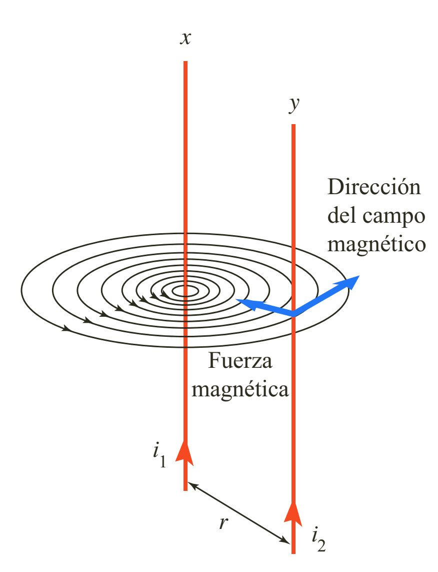


Figura 6. La interacción de los campos magnéticos, producidos por las corrientes que circulan por dos conductores, genera una fuerza magnética entre ellos.



1.4 Algunas aplicaciones

1.4.1 El electroimán

Es muy habitual encontrar en algunos aparatos el empleo de los electroimanes. Por ejemplo, en los timbres, en los frenos, en los interruptores, en los aceleradores de partículas, en los teléfonos, los transformadores, para trasladar objetos de hierro pesados, etc. (figura 7).

Un electroimán es una bobina (solenoide) larga cuyo núcleo se encuentra formado de hierro el cual produce un campo magnético cuando pasa cierta corriente por las espiras de la bobina.

Cuando al solenoide se le introduce en su interior un bloque de hierro llamado núcleo, el campo magnético se hace cientos y hasta miles de veces mayor. La explicación se debe a que los dominios magnéticos del hierro, se alinean en la dirección del campo magnético del solenoide y en consecuencia el hierro actúa como un imán potente que se adiciona al campo magnético del solenoide.

Al dejar de pasar corriente por el solenoide el campo magnético disminuye notablemente y el hierro va perdiendo sus facultades de imán.



Figura 7. Los electroimanes tienen diferentes aplicaciones como el traslado de objetos pesados de hierro.

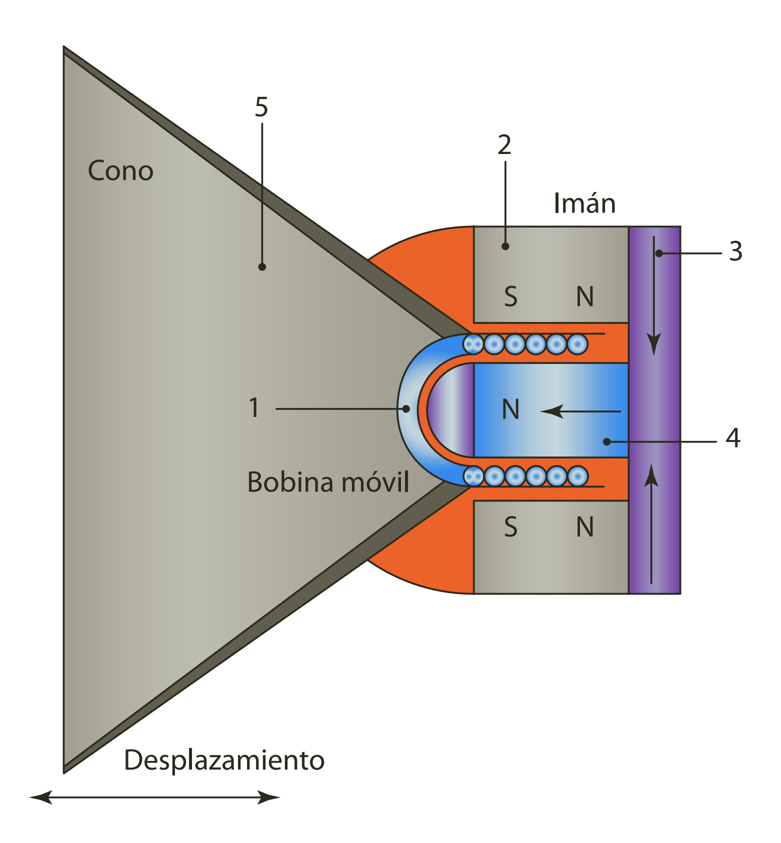
1.4.2 El parlante

El parlante se encarga de transformar en sonido las señales eléctricas que llegan del amplificador de un equipo de sonido. La mayoría de los parlantes tienen cinco partes básicas:

1. *Bobina móvil cilíndrica,* de material liviano y alambre de cobre.
2. *Imán permanente anular,* generalmente cerámico ferromagnético.
3. *Disco posterior magnético blando,* generalmente metálico y ferromagnético.
4. *Cilindro concéntrico magnético blando,* generalmente metálico y ferromagnético.
5. *Cono o diafragma cónico de cartón o plástico,* adherido a la bobina.

Al moverse la membrana de forma oscilante, produce ondas sonoras de la misma forma que la membrana de un bombo o las cuerdas de una guitarra. El movimiento de la membrana lo produce una bobina sujeta a aquella, a la que llegan las señales eléctricas del amplificador.

La bobina está situada sobre un vástago y rodeada por un imán circular. Al pasar la corriente por la bobina, esta se convierte en un imán que interactúa con él que la rodea, creando movimientos de vaivén que se transmiten a la membrana. Cuando la tensión de la bobina es más fuerte, su movimiento es mayor y la membrana emite sonidos más fuertes.



2. Inducción electromagnética

2.1 Los experimento de Faraday y Henry

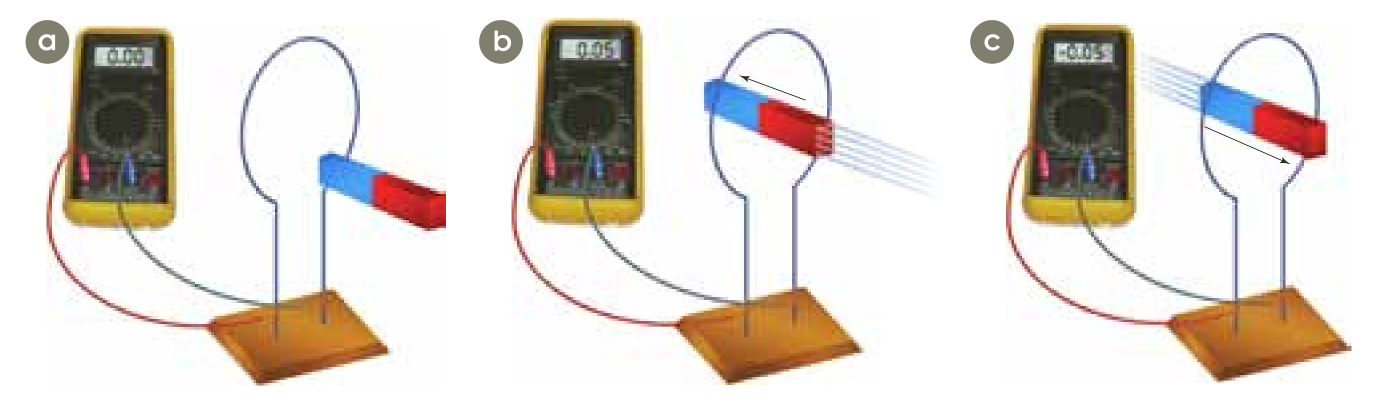
Después del hallazgo de Oersted en 1820, con relación al campo magnético inducido por una corriente eléctrica, los físicos empezaron a realizar experimentos para hallar el proceso contrario, es decir que a partir de un campo magnético se produzca una corriente eléctrica.

Esta época de esfuerzo culminó con éxito en el año 1831, en el cual Joseph Henry en Estados Unidos y, de manera independiente, Michael Faraday en Inglaterra pusieron en manifiesto que un campo magnético variable en el tiempo era capaz de generar electricidad.

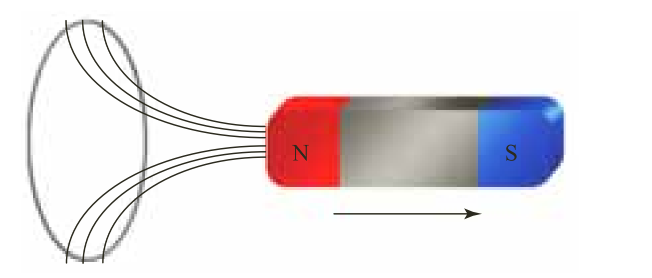
Los trabajos realizados por los investigadores se resumen en un experimento, por medio del cual es posible crear corriente eléctrica en un circuito a partir de fenómenos magnéticos.

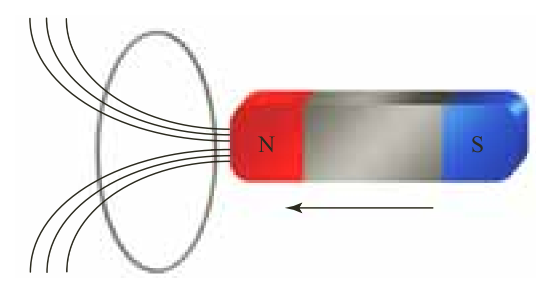
Este experimento consiste en un circuito eléctrico formado por una espira conectada a un galvanómetro, y un imán de barra colocado perpendicular a la espira (figura a). Cuando se acerca e introduce el imán a la espira, se observa que el galvanómetro indica el paso de una corriente por ella (figura b), corriente que se interrumpe cuando el imán se detiene.

Si ahora se saca el imán de la espira, se vuelve a observar el paso de la corriente mientras el imán está en movimiento, pero esta vez en sentido contrario al de la situación anterior (figura c).



Faraday concluyó respecto a este fenómeno que: la corriente eléctrica aparece porque al acercarse o alejarse el imán a la espira, se produce un cambio en el número de líneas de campo magnético que atraviesan la espira, tal como se observa en la siguiente figura.







2.2 Flujo del campo magnético

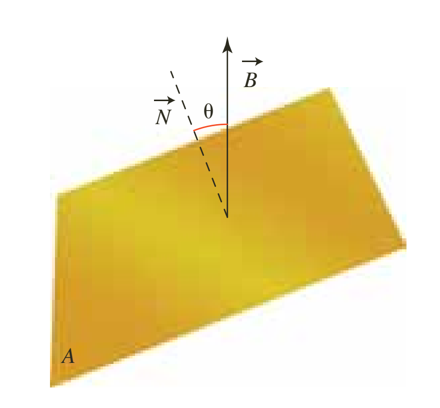


Figura 8. Esquema que muestra el vector campo magnético $\vec{B}$ y el vector que representa el área de la espira $\vec{N}$.

Para determinar el número de líneas que atraviesan la espira, Faraday introdujo la noción de **flujo magnético, Φ**, que lo definió como el producto escalar del vector intensidad del campo magnético por el área de la espira, es decir:

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{A}$$

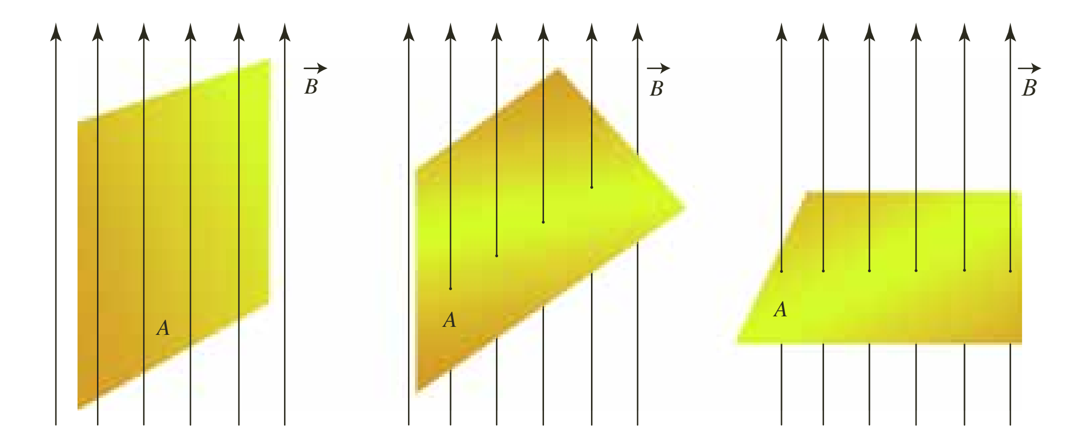
Sin embargo, al igual que ocurre en el caso del campo gravitatorio o el campo electrostático, esta relación solo sirve cuando el campo magnético es uniforme y perpendicular al mismo; ya que si no se presentan estas condiciones, se debe utilizar la proyección perpendicular, con lo cual el flujo resulta ser igual al producto escalar del vector campo por el vector representativo de área de la espira, tal como se observa en la figura 8.

Para este caso, la expresión que permite determinar el flujo magnético es:

$$\Phi = B \cdot A = B \cdot A \cdot \cos\theta$$

La unidad de flujo magnético en el SI es el weber (Wb), en honor al físico alemán W. Edward Weber y es equivalente a un tesla sobre m^2.

Si las líneas del campo magnético son paralelas a la superficie (y perpendiculares a $\vec{N}$), entonces el flujo es nulo. El valor del flujo aumenta a medida que el ángulo θ decrece, alcanzando su máximo valor cuando el campo es perpendicular a la superficie, tal como se observa en la siguiente figura.



2.2.1 Ley de Gauss

El matemático y físico Karl Friedrich Gauss (1777-1855), dedujo una relación importante para la electricidad relacionando la carga eléctrica con el campo eléctrico. La ley de Gauss involucra el flujo total a través de una superficie cerrada.

El flujo eléctrico es igual a la carga neta encerrada en la superficie (Q) sobre la constante de permisividad en el espacio vacío (ϵ_0).

Al extenderla al campo magnético, las distribuciones de fuentes magnéticas son siempre neutras en el sentido de que posee un polo norte y un polo sur, por lo que su flujo a través de cualquier superficie cerrada es nulo.

La ley de Gauss aplicada al campo magnético corrobora la inexistencia de monopolos magnéticos.



Michael Faraday. Estableció que la variación del flujo magnético con respecto al tiempo es igual a la fuerza electromotriz.

2.3 Inducción electromagnética

Faraday y Henry establecieron que era posible generar corriente eléctrica a través de un alambre con el simple hecho de ingresar y sacar un imán de una bobina. Demostrando que no era indispensable la utilización de algún generador eléctrico, solo con el movimiento relativo entre el alambre y un campo magnético era factible inducir un voltaje.

Sin embargo, la magnitud de este voltaje inducido depende de la rapidez con la cual el alambre recorre las líneas de campo magnético, ya que si este movimiento es muy lento, el valor del voltaje es muy pequeño, mientras si el movimiento se realiza con cierta rapidez el voltaje inducido presenta un valor mayor.

Así mismo, la cantidad de espiras también permite obtener diferentes valores para el voltaje inducido, ya que cuanto mayor es el número de espiras de alambre que se desplazan en el campo magnético, mayores son el voltaje inducido y la corriente en el alambre.

En conclusión, no importa que acción es la que induce el voltaje, ya que este se genera debido al movimiento relativo entre la bobina y el campo magnético. Por lo cual es posible afirmar que toda variación en el flujo del campo magnético a través del área limitada por un circuito genera corriente eléctrica en él. Este fenómeno de inducir voltaje alternando el campo magnético en torno a un conductor se denomina **inducción electromagnética**.

Las corrientes generadas por la inducción electromagnética se conocen como corrientes inducidas, como lo son las corrientes que se generan al momento de cerrar o abrir un circuito.

2.3.1 Fuerza electromotriz inducida: la ley de Faraday

Faraday, durante sus observaciones, estableció que cuánto más rápido cambia el flujo magnético mayor es la corriente inducida en la bobina. En el momento de introducir o retirar el imán en la bobina, el galvanómetro registra una corriente en ella. Pero este valor del galvanómetro aumenta a medida que aumenta la rapidez en la introducción o el retiro del imán.

La ley de inducción de Faraday enuncia que el valor de la fuerza electromotriz (fem) inducida en el conductor que limita la superficie atravesada por el flujo magnético, depende de la rapidez de la variación del flujo magnético.

Estas experiencias se traducen en la **ley de Faraday**.

Definición

La fuerza electromotriz (ε) inducida en un circuito es igual a la variación con respecto al tiempo (t) del flujo (Φ) que atraviesa dicho circuito.

Esta ley se expresa como:

$$\varepsilon = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Siendo $\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$, la variación del flujo magnético y $\Delta t = t_2 - t_1$, la variación del tiempo. Después de analizar esta consecuencia de los trabajos de Faraday, Maxwell imaginó que tal vez este fenómeno inverso fuera verdadero, es decir, que un campo eléctrico variable debería inducir un campo magnético.



2.3.2 Ley de Lenz

Cuando se acerca un imán a una bobina, el flujo magnético que la atraviesa aumenta y la corriente que se induce produce un campo magnético de sentido contrario al del imán, por lo que dicha corriente se opone al aumento del flujo.

Si en vez de acercarse el imán se aleja, el flujo magnético que atraviesa la bobina disminuye y esta corriente inducida produce también un campo magnético de sentido contrario al del imán, por lo que la corriente se opone a la disminución del flujo.

Luego, en ambos casos, el sentido de la corriente se opone a las variaciones de flujo magnético que se producen. Este resultado se conoce como la **ley de Lenz**.



Una espira de 0,02 m^2 se encuentra perpendicular al campo magnético uniforme de 0,2 T. Determina cuál es la magnitud de la fuerza electromotriz inducida cuando la espira gira 90° en 0,2 s.

Definición

El sentido de la corriente inducida es tal que el campo magnético que dicha corriente produce se opone a la variación del flujo que la causó.

Esta oposición al cambio de flujo es la razón por la cual se utiliza el signo negativo en el segundo miembro de la ecuación de la ley de Faraday:

$$\varepsilon = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Para una bobina de N espiras la ley de Faraday se expresa:

$$\varepsilon = -N \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

EJEMPLOS

1. **Por una bobina, de 100 espiras y área transversal de 4 cm^2, se hace pasar un campo magnético, cuyas líneas de campo son perpendiculares al área transversal de la bobina, de tal forma que el flujo magnético varía uniformemente desde 0 T hasta 0,4 T durante 0,02 s. Calcular la fem inducida en la bobina.**

Solución:

Para calcular la fem hallemos la variación del flujo magnético.

$\Phi = B \cdot A \cdot \cos\theta$

$\Phi_i = 0\ \text{T} \cdot A \cdot \cos\theta = 0\ \text{Wb}$ — *Flujo inicial en la bobina*

$\Phi_f = 0{,}4\ \text{T} \cdot 4 \times 10^{-4}\ \text{m}^2 \cdot \cos 0°$

$= 1{,}6 \times 10^{-4}\ \text{Wb}$ — *Flujo final*

$\varepsilon = -N \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ — *Ecuación de la fuerza electromotriz*

$$\varepsilon = -100 \cdot \frac{1{,}6 \times 10^{-4}\ \text{Wb}}{0{,}02\ \text{s}} = -8 \times 10^{-1}\ \text{V}$$

La fem inducida es de 0,8 V.

2. **Una espira de sección circular está en un campo magnético de intensidad variable, formando el vector asociado a la superficie un ángulo de 30° con el vector inducción. Si el flujo magnético a través de la espira cambia de 4 · 10^{-5} Wb a 10 · 10^{-5} Wb en 0,01 s, ¿cuál es el valor medio de la fem inducida?**

Solución:

Aplicando la ecuación de la fuerza electromotriz, tenemos que:

$$\varepsilon = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{-(\Phi_2 - \Phi_1)}{t_2 - t_1}$$

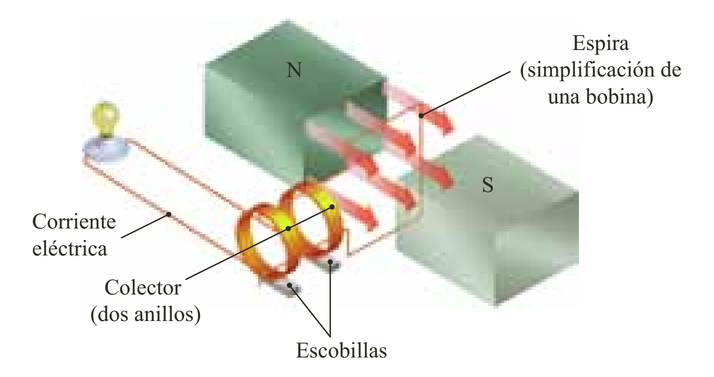
$$\varepsilon = -\frac{(10 \times 10^{-5}\ \text{Wb} - 4 \times 10^{-5}\ \text{Wb})}{0{,}01\ \text{s}} = -6 \times 10^{-3}\ \text{V}$$ *Al remplazar y calcular*

2.4 Algunas aplicaciones

2.4.1 Generadores electromagnéticos

Aunque las baterías y las pilas generan electricidad, estas presentan ciertas limitaciones, ya que no sirven para aparatos eléctricos con un gran consumo energético, como la mayor parte de los electrodomésticos. En este caso, es necesario implementar el uso de alternadores y dinamos, cuya estructura se encuentra formada por un imán fijo y una bobina que gira en el campo magnético creado por el imán.

- **El alternador:** cuando la bobina se encuentra en reposo, no es posible generar corriente. Pero, a medida que la bobina gira, se origina una variación de campo magnético y se genera una corriente eléctrica que cambia periódicamente de sentido.

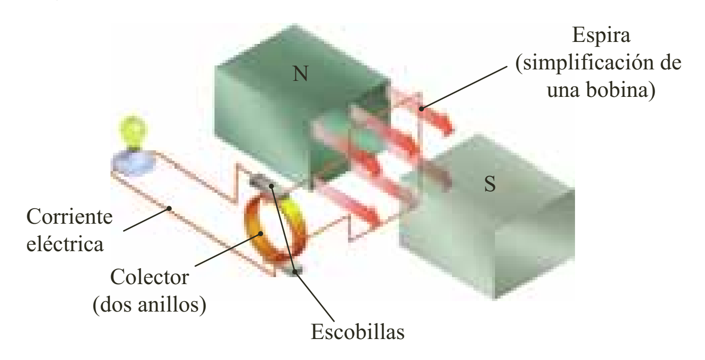


La corriente eléctrica generada se envía al exterior a través de un colector conectado a la bobina y unido a dos escobillas o contactos de salida.

El alternador es un generador de corriente alterna. Los generadores de las centrales eléctricas, por ejemplo, son alternadores.

- **La dinamo:** el funcionamiento de una dinamo es similar al del alternador.

El colector está formado por un único anillo y, mediante un sistema mecánico sencillo se consigue que los extremos de la bobina hagan contacto alternativamente con las escobillas, de tal manera que una sea siempre positiva y la otra, negativa. De este modo, la corriente alterna generada se transforma en corriente continua.



Una de las aplicaciones más corrientes de la dinamo ha sido la de generar energía eléctrica para el funcionamiento de un automóvil. Sin embargo, su utilización disminuyó debido a que presentaba problemas al suministrar corriente cuando el motor estaba en pleno rendimiento.

2.4.2 Producción de corriente alterna

La producción de corriente alterna es muy sencilla, por tal razón es la más utilizada tanto a nivel doméstico como a nivel industrial. Su producción se encuentra relacionada con la variación en el flujo magnético que atraviesa un conductor, es decir, al giro a gran velocidad entre los polos de un electroimán (inductor) de una bobina (inducido) en un campo magnético.

Al producirse el giro, el flujo magnético que el inductor genera sobre el inducido experimenta una variación continua, por lo cual se produce una corriente alterna en el inducido que, es transportada, por medio de cables, hasta los lugares donde posteriormente será utilizada.

Cuando al inducido se le genera una velocidad angular, ω, constante, estando en el interior del inductor (se crea un campo magnético uniforme B), se induce una corriente debido a que el movimiento hace variar el flujo magnético sobre el inducido. La fuerza electromotriz inducida que se genera en cada espira cambia de manera sinusoidal y se expresa como:

$$\varepsilon_{máx} = B \cdot A \cdot \omega \cdot \text{sen}\,(\omega \cdot t) = \varepsilon_{máx} \cdot \text{sen}\,(\omega \cdot t)$$

Como la función seno toma como máximo valor la unidad, $\varepsilon_{máx}$ es:

$$\varepsilon_{máx} = B \cdot A \cdot \omega$$

Para el caso de que el inducido conste de N espiras iguales, el valor de la fem máxima generada por el inducido es:

$$\varepsilon_{máx} = N \cdot B \cdot A \cdot \omega$$

Si se unen los extremos del inducido a una resistencia R, y consideramos despreciable la resistencia propia del inducido, circulará una corriente, que en aplicación de la ley de Ohm es igual a:

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{\varepsilon_{máx}}{R} \cdot \text{sen}\,(\omega \cdot t)$$

De acuerdo con el valor máximo del seno, entonces:

$$I = \frac{\varepsilon_{máx}}{R}$$

EJEMPLO

Una bobina formada por 500 espiras circulares de radio 5 cm gira a 300 r.p.m. en el interior de una campo magnético de 5 · 10⁻³ T. Si la bobina se conecta a un foco cuya resistencia es de 300 Ω, ¿cuál es la máxima intensidad de corriente que pasa por ella?

Solución:

Para calcular el valor máximo de la fem, debemos determinar:

$A = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot (5 \times 10^{-2}\ \text{m})^2 = 7{,}9 \times 10^{-3}\ \text{m}^2$

$\omega = 300\ \text{r.p.m.} \cdot 2\pi/60 = 31{,}4\ \text{rad/s}$

Aplicando la ecuación para hallar la fem máxima para una bobina de N espiras, tenemos que:

$\varepsilon_{máx} = (500)(5 \times 10^{-3}\ \text{T})(7{,}9 \times 10^{-3}\ \text{m}^2)(31{,}4\ \text{rad/s})$

$\varepsilon_{máx} = 0{,}6\ \text{V}$ *Al calcular*

Aplicando la ecuación de la ley de Ohm, tenemos:

$$I = \frac{\varepsilon_{máx}}{R} = \frac{0{,}6\ \text{V}}{300\ \Omega} = 2 \times 10^{-3}\ \text{A}$$

La máxima intensidad de corriente generada es 2×10^{-3} A.

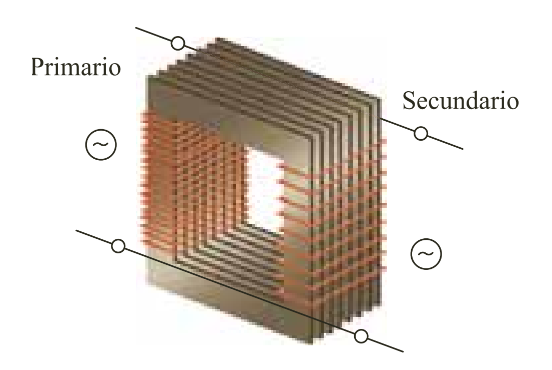
2.4.3 El transformador

Al observar las indicaciones técnicas de muchos aparatos eléctricos utilizados a diario, es posible encontrar que se especifica el voltaje al cual puede someterse para que funcione, es decir, el voltaje que tiene el generador del circuito.

Los aparatos eléctricos que se conectan a la red eléctrica, reciben un voltaje residencial de 110 V suministrado por la compañía de energía eléctrica en nuestro país. Así mismo, ciertos aparatos que funcionan con un voltaje menor y una corriente continua, suministrada por las pilas, pueden conectarse a la red eléctrica y funcionar sin llegar a ocasionar algún daño en el aparato.

Para tal efecto, emplean la ayuda de un elemento denominado transformador, que modifica y rectifica la corriente eléctrica. El **transformador** convierte la corriente de la red eléctrica en una corriente con menor diferencia de potencial y el rectificador, convierte la corriente alterna en continua.

Un transformador está compuesto de dos partes: el devanado primario (primera bobina) y el devanado secundario (segunda bobina), tal como se representa en la siguiente figura.



Cuando circula corriente alterna por el primario, se induce una corriente alterna al secundario. Si el transformador es un reductor de voltaje, la cantidad de espiras en el primario será mayor que en el secundario, por lo cual la corriente inducida presentará un menor voltaje que el inicial. Pero, si el transformador es un elevador de voltaje, el secundario tendrá mayor cantidad de espiras y por tanto, un mayor voltaje.

La relación entre el voltaje proporcionado por el generador a la bobina primaria (V_1) y el voltaje obtenido de salida (V_2) es:

$$V_2 = \frac{N_2}{N_1} \cdot V_1$$

Según la ley de Faraday, la relación entre la fuerza electromotriz inducida y el número de espiras es:

$$\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

Si suponemos que la resistencia del conductor es despreciable y por lo tanto, el efecto Joule no se percibe, seguramente la potencia suministrada a la bobina primaria debe ser igual a la potencia suministrada a la bobina secundaria. Como la potencia eléctrica es $P = i \cdot V$, obtenemos:

$$i_1 \cdot V_1 = i_2 \cdot V_2$$

EJEMPLO

Se quiere construir un transformador reductor de voltaje a 12 V. Si la bobina primaria tiene 100 espiras y se alimenta con un voltaje de 120 V, calcular:

a. El número de espiras en la bobina secundaria.

b. La intensidad de corriente que pasa por la bobina secundaria si por la primaria pasan 0,2 A.

Solución:

a. Si no hay efecto Joule en las bobinas, el número de espiras en la bobina secundaria está dado por la expresión:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$\frac{120\text{ V}}{12\text{ V}} = \frac{100\text{ espiras}}{N_2} \Rightarrow N_2 = 10\text{ espiras}$$

El número de espiras en la bobina secundaria es 10.

b. Para hallar la intensidad de corriente en cada bobina, tenemos:

$$i_1 \cdot V_1 = i_2 \cdot V_2$$

$$0{,}2\text{ A} \cdot 120\text{ V} = i_2 \cdot 12\text{ V} \Rightarrow i_2 = 2\text{ A}$$ *Al remplazar y calcular*

Por la bobina secundaria pasa una corriente de 2 A.

2.5 La síntesis de Maxwell

A finales del siglo XVIII y durante el siglo XIX, los fenómenos eléctricos y magnéticos fueron el quehacer diario de los físicos de la época. El uso del concepto de campo magnético y eléctrico solo se difundió hasta cuando James Clerk Maxwell demostró que todos los fenómenos eléctricos y magnéticos podían describirse y sintetizarse en tan solo cuatro ecuaciones:

- La **primera ecuación** relaciona la carga y la distribución del campo magnético. Incluye la ley de Coulomb pero es más general, ya que abarca cargas en movimiento. Esta ecuación es la ley de Gauss en la que el flujo eléctrico es igual a la carga neta encerrada en la superficie (Q) sobre la constante de permisividad en el espacio vacío (ε_0).
- La **segunda ecuación** es la aplicación de la ley de Gauss al campo magnético que corrobora la inexistencia de monopolos magnéticos y establece que las distribuciones de fuentes magnéticas son siempre neutras en el sentido de que posee un polo norte y un polo sur, por lo que su flujo a través de cualquier superficie cerrada es nulo.
- La **tercera ecuación** corresponde a la ley de Faraday, en donde un campo eléctrico es producido por un campo magnético fluctuante.
- La **cuarta ecuación** es la ley de Faraday aplicada al campo magnético, que determina que un campo magnético es producido por un campo eléctrico fluctuante.

A partir de las dos últimas ecuaciones, Maxwell concluyó que el resultado neto de estos dos campos variantes, eléctricos y magnéticos, es la producción de una onda electromagnética que se propaga por el espacio (figura 9), definiendo de esta manera la composición electromagnética de luz. En general, las ondas electromagnéticas se originan en cargas eléctricas aceleradas y de acuerdo con su frecuencia pueden ser de radio, ultravioleta, infrarroja, etc.

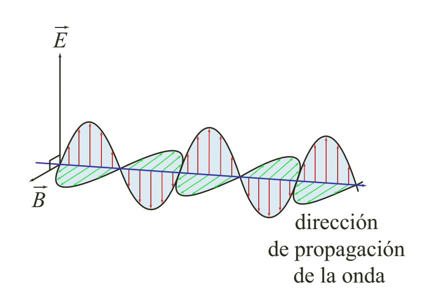
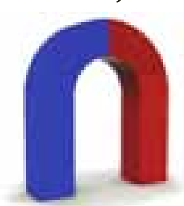


Figura 9. La composición de la luz, como onda electromagnética, se produce como resultado de dos campos variantes, el campo magnético y el campo eléctrico.

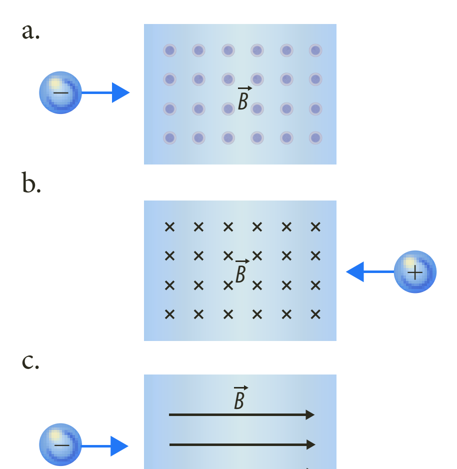
Interpreta

1 **Habitualmente los imanes tienen pintado el polo norte con un color y el polo sur con otro. Si se rompe un imán justo por la zona que separa los colores, ¿habremos separado el polo norte del polo sur del imán? Justifica tu respuesta.**



2 **Si frotamos una aguja de hierro contra un imán siempre en el mismo sentido, la aguja adquiere propiedades magnéticas. Esas propiedades desaparecen con el tiempo y muy rápidamente si ponemos la aguja en una llama. Explica estos fenómenos.**

3 **Indica en qué dirección se desviarán las partículas que penetran en los siguientes campos magnéticos. El recuadro grande representa el campo magnético, y la flecha azul, la dirección y sentido de la velocidad de la partícula cargada.**



4 **A partir de la forma en que se orienta la aguja de una brújula dentro de un campo magnético explica por qué se puede concluir que el polo sur magnético de la Tierra se encuentra cerca del polo norte geográfico.**

5 **Un circuito formado por una espira circular de 10 cm de radio, se encuentra en el interior de un campo magnético de 8×10^{-4} T y es perpendicular a él. Si en una centésima de segundo el campo magnético disminuye a 10^{-4} T, calcula la fuerza electromotriz inducida.**

Argumenta

6 **Algunos experimentos llevados a cabo con pájaros parecen indicar que ellos poseen la capacidad de orientarse con respecto a un campo magnético. En estos experimentos se capturaron aves migratorias y fueron colocadas en jaulas. Estando en las jaulas, todavía tendían a orientarse en la dirección de su vuelo migratorio, pero cuando se les colocaron grandes bobinas a cada lado de la jaula para cambiar la dirección del campo magnético terrestre, las aves cambiaron su orientación.**

a. ¿Vale la pena el uso de animales para realizar experimentos?

b. ¿Qué beneficios obtiene el hombre de saber que las aves se orientan con el campo magnético?

c. Averigua qué otros animales son sensibles al campo magnético de la Tierra.

7 **Responde. ¿Crees que el descubrimiento de que es posible generar campos magnéticos usando corriente eléctrica es un gran adelanto?**

8 **Dos conductores paralelos transportan corriente en la misma dirección, ¿será que se atraen o se repelen?**

Propone

9 **Si no existiera el campo magnético terrestre muchas cosas no funcionarían. Explica cómo crees que sería la vida en la Tierra sin campo magnético.**

10 **Responde. ¿Crees que los campos magnéticos producidos por los celulares, computadores o televisores son dañinos para el hombre? Consulta sobre el tema.**

11 **Realiza un cuadro comparativo entre los materiales ferromagnéticos, paramagnéticos y diamagnéticos.**

12 **Los aceleradores de partículas funcionan gracias a campos magnéticos que son los encargados de mover las partículas a velocidades cercanas a la de la luz. Al hacer chocar las partículas a grandes velocidades se obtienen subpartículas, pero se cree que su funcionamiento es de gran riesgo para la Tierra. Consulta sobre el tema y realiza un debate con tus compañeros de clase.**

Actividades

Verifica conceptos

1 **Escribe V, si la afirmación es verdadera o F, si es falsa. Justifica tu respuesta.**

- ☐ La temperatura a la cual los imanes pierden sus propiedades magnéticas se llama temperatura de Curie.
- ☐ El polo norte de un imán apunta al sur magnético de la Tierra.
- ☐ Las líneas de campo de un imán se dirigen de sur a norte en el interior del imán.
- ☐ La fuerza magnética es paralela al campo magnético.
- ☐ En el espectrógrafo de masas, la masa depende de la trayectoria que describe la partícula cuando actúa sobre ella un campo magnético.
- ☐ La intensidad del campo magnético no depende de la intensidad de corriente generada sobre un material conductor.
- ☐ La fuerza magnética es directamente proporcional al campo magnético generado sobre un conductor.
- ☐ Entre cargas eléctricas actúan siempre fuerzas magnéticas.

2 **Completa los siguientes enunciados.**

a. Todo imán tiene dos polos ____________ el ____________ y el ____________ cuya interacción produce fuerzas de repulsión y atracción.

b. El campo magnético es la región donde se manifiestan fuerzas ____________ producidas por un ____________.

c. El ____________ de masas se usa para separar ____________ mediante un campo magnético ____________.

d. El electroimán es un ____________ cuyo núcleo está hecho de ____________, el cual genera un campo magnético cuando pasa corriente por las espiras de la ____________.

3 **Establece diferencias entre:**

a. Generadores y motores.

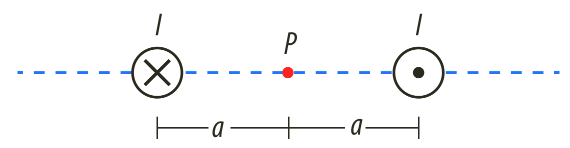
b. Condensadores y bobinas.

Analiza y resuelve

4 **Tienes cuatro imanes de barra, ¿cómo los ordenarías para formar un cuadrado estable?**

5 **Los televisores de pantalla de vidrio utilizan campos magnéticos para mostrar imágenes, ¿cuántos campos magnéticos utilizan?**

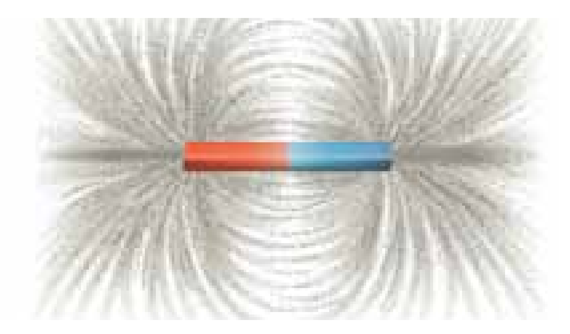
6 **Calcula la intensidad e indica la dirección con respecto a la hoja del campo magnético generado en el punto P del conductor finito mostrado.**



7 **Responde. ¿Por qué las bobinas de los transformadores están enrolladas en un núcleo de hierro?**

8 **Un imán se acerca a una espira enfrentando su polo sur. Realiza un esquema indicando cómo son las líneas de campo del imán.**

9 **Responde. ¿Por qué se utiliza limaduras de hierro para visualizar el campo magnético? ¿Se podría usar las de cualquier otro metal?**



10 **Además de los imanes, las cargas eléctricas también producen campos magnéticos. ¿En qué condiciones sucede esto?**

11 **Responde. ¿Es posible que una partícula cargada sometida a la acción de un campo electrostático tenga movimiento uniforme? ¿Y si la partícula está sometida a la acción de un campo magnético?**

12 **Una partícula con carga q, penetra en una región en la que existe un campo magnético perpendicular a la dirección del movimiento. Analiza el trabajo realizado por la fuerza magnética y la variación de energía cinética de la partícula.**

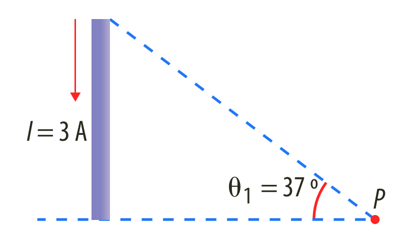
Actividades

Problemas básicos

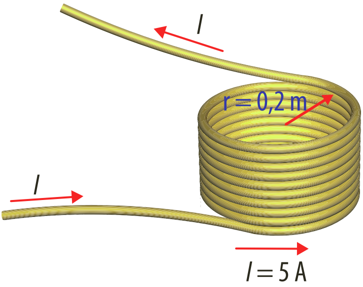
13 **Una partícula cargada con $q = 20\ \mu C$ ingresa perpendicularmente a un campo uniforme de 1 T, con una velocidad de $2 \cdot 10^6$ m/s. Calcula la intensidad de la fuerza magnética que actúa sobre la carga.**

14 **Una espira de alambre de 50 cm de radio y que transporta una corriente de 2 A, está en un campo magnético uniforme de 0,4 T. Determina el torque máximo que actúa sobre la espira.**

15 **Calcula la dirección y la intensidad del campo magnético generado en el punto *P* que se indica en la figura.**

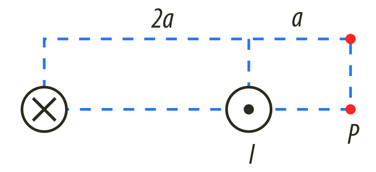


16 **Calcula la intensidad y la dirección del campo magnético en el centro del conjunto de 10 espiras.**

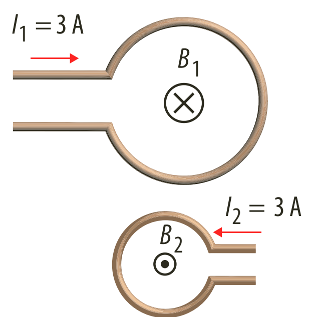


17 **Responde. ¿A qué distancia de un alambre conductor por el cual circula una corriente de 95 A, actúa un campo magnético de $1,2 \times 10^{-4}$ T?**

18 **Calcula la dirección y la intensidad del campo magnético generado en el punto *P*, debido a dos conductores rectilíneos muy largos, cuyas intensidades se especifican en la figura.**



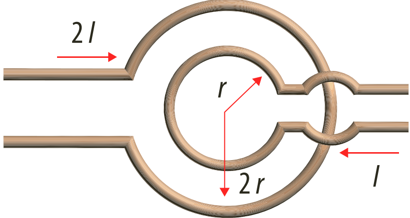
19 **Calcula la intensidad y la dirección del campo magnético resultante, con respecto a la hoja, generado por dos espiras circulares coplanares y concéntricas, como se muestra en la figura.**



20 **En el ejercicio anterior, indica en qué proporción deben estar las intensidades de corriente para que el campo sea nulo.**

21 **Calcula la intensidad de un campo magnético en el centro de una espira de radio 10 cm que transporta una corriente de 5 A.**

22 **Calcula la intensidad del campo magnético generado en el centro de las espiras de la figura que se muestra.**



23 **Si un electrón ($e = 1,6 \times 10^{-19}$ C) ingresa perpendicularmente en una región donde el campo magnético es de 10 T:**

a. ¿Con qué velocidad debe ingresar al campo para que la fuerza que el campo ejerce sobre el electrón sea de 5×10^{-15} N?

b. ¿Cómo debe ser la dirección del vector campo magnético comparado con la dirección del vector velocidad para que el electrón experimente esta fuerza? Explica tu respuesta.

24 **Se tiene un conductor que transporta una corriente de 4 A. Un segmento de 30 cm de dicho conductor está expuesto perpendicularmente a un campo magnético uniforme de 0,4 T. Calcula la intensidad de la fuerza aplicada sobre el segmento.**

25 **Sobre un alambre de 50 cm de longitud actúa un campo magnético de 0,0005 T en dirección horizontal. Si por el conductor circula una corriente de 0,2 A, ¿cuál es el valor de la fuerza que experimenta el conductor?**

26 **Se construye una bobina de 45 cm de longitud y 8 cm de diámetro. Cuando la corriente que circula por ella es de 2,3 A, en su parte central se genera un campo magnético de 0,05 T. ¿Cuál es el número de vueltas o espiras que se deben enrollar?**

Problemas de profundización

27 **Un haz de electrones pasa sin ser desviado de su trayectoria rectilínea a través de dos campos: uno eléctrico y otro magnético, mutuamente perpendiculares. El haz incide perpendicularmente en ambos campos. El campo eléctrico, que supondremos constante, está generado por dos placas cargadas paralelas separadas 1 cm, entre las que existe una diferencia de potencial de 80 V. El campo magnético también es constante, siendo su módulo $2 \cdot 10^{-3}$ T. A la salida de las placas, sobre el haz actúa únicamente el campo magnético, describiendo los electrones una trayectoria circular de 1,14 cm de radio.**

a. Calcula el campo eléctrico generado por las placas.

b. Calcula la velocidad del haz de electrones.

c. Deduce, a partir de los datos anteriores la relación masa-carga (m/q) del electrón.

28 **Un electrón se acelera desde el reposo por una diferencia de potencial de 10 kV y a continuación entra en un campo magnético de 0,5 T, perpendicular a la velocidad del electrón.**

a. Determina la velocidad del electrón dentro de un campo magnético.

b. Haz un esquema de la trayectoria que seguirá el electrón dentro del campo magnético e indica la dirección y el sentido, tanto de la velocidad del electrón como del campo magnético.

c. Calcula el radio de la trayectoria del electrón dentro de un campo magnético.

29 **Un protón que se mueve con una velocidad constante en el sentido positivo del eje x penetra en una región del espacio donde hay un campo eléctrico $E = 4 \cdot 10^5$ N/C en el eje z y un campo magnético $B = -2$ T en el eje y.**

a. Determina la velocidad que debe llevar el protón para que atraviese dicha región sin ser desviado.

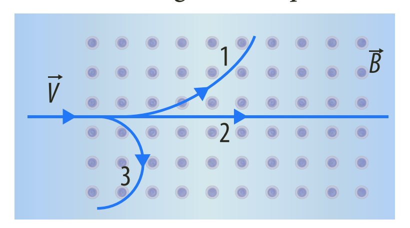
b. Describe qué le ocurre al protón si $E = 6 \times 10^5$ N/C en el eje z.

c. Describe qué le ocurre al protón si $B = -3$ T en el eje y.

30 **La figura representa una región donde existe un campo magnético uniforme B, cuyas líneas de campo son perpendiculares al plano del papel y se dirigen fuera del mismo. Si entran sucesivamente tres partículas con la misma velocidad v, y describe cada una de ellas la trayectoria que se muestra en la figura:**

a. ¿Cuál es el signo de la carga de cada una de las partículas?

b. ¿En cuál de ellas es mayor el valor absoluto de la relación carga-masa, q/m?

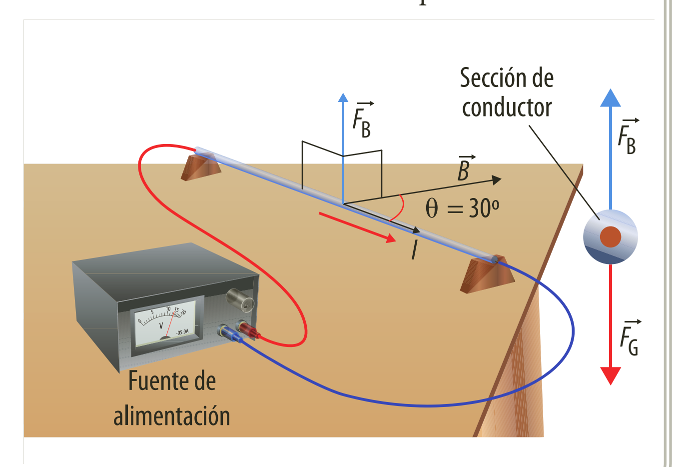


31 **Se realiza un montaje de laboratorio en el que un conductor rectilíneo paralelo a la mesa y apoyado sobre unos soportes que lo levantan 3 cm, transportan una corriente de 0,5 A. Sobre la mesa se coloca un imán que genera un campo magnético de 0,5 T que forma un ángulo de 30° con el conductor y apunta hacia la derecha como se observa en la figura.**

Calcula:

a. El módulo de la fuerza por unidad de longitud que actúa sobre el conductor.

b. Si el conductor tiene una longitud de 40 cm, determina en qué sentido debe circular la corriente y cuál debe ser su masa para que pueda levitar sin necesidad de soportes.



Actividades

Verifica conceptos

1. **Define qué es una corriente eléctrica inducida y explica en qué se diferencia de una corriente convencional.**

2. **Una corriente eléctrica consiste en un movimiento de cargas a través de un conductor. Para que se produzca es necesario que un generador suministre energía a las cargas. Acercando un imán a un hilo de corriente cerrado se puede inducir una corriente sin que exista un generador. ¿Es un ejemplo de generación espontánea de energía?**

3. **Escribe V, si el enunciado es verdadero o F, si es falso. Justifica tu respuesta.**
   - ☐ Todo campo magnético genera una corriente eléctrica.
   - ☐ Faraday concluyó que al acercar y alejar el imán del conductor no hay cambio en las líneas de campo magnético que atraviesa la espira.
   - ☐ La fuerza electromotriz inducida depende de la variación del campo magnético que atraviesa a un circuito.
   - ☐ El transformador convierte la corriente de la red eléctrica en una corriente con menor diferencia de potencial.
   - ☐ Para que un motor de corriente continua funcione es necesario alimentarlo con corriente mediante colectores.

4. **Relaciona cada ley con su definición.**

   a. Ley de Maxwell. b. Ley de Lenz.
   c. Ley de Gauss. d. Ley de Faraday.

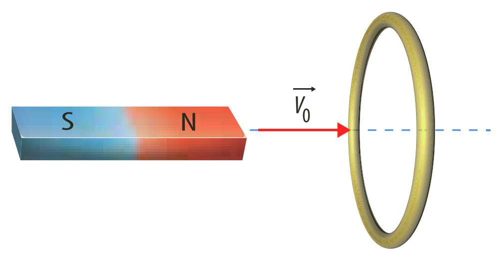
   - ☐ El flujo eléctrico es igual a la carga neta encerrada en la superficie sobre la constante de permisividad en el espacio vacío.
   - ☐ La fuerza electromotriz inducida en un circuito es igual a la variación con respecto al tiempo del flujo que atraviesa dicho circuito.
   - ☐ El campo magnético es producido por un campo eléctrico fluctuante.
   - ☐ El sentido de la corriente inducida es tal que el campo magnético que dicha corriente produce es opuesto al cambio del flujo que la causó.

Analiza y resuelve

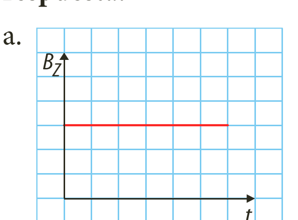
5. **Responde. ¿Qué sucede cuando circula la corriente eléctrica por un conductor situado en el interior de un imán de herradura?**

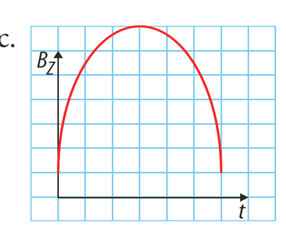
6. **Responde. ¿Qué diferencia hay entre el inductor y el inducido de un motor eléctrico?**

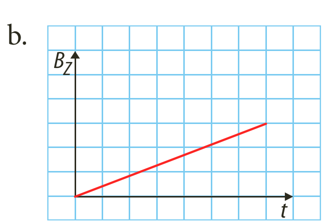
7. **Un imán como el de la figura se aproxima a una espira conductora con velocidad v_0. ¿Aumenta o disminuye el flujo magnético en la espira? ¿Se inducirá una corriente en la espira? ¿En qué dirección, horario o antihorario mirando desde el imán? Justifica tus respuestas.**



8. **Responde. ¿Qué campo magnético de los tres que se presentan en las figuras deberemos aplicar a una espira cuadrada que descansa en el plano *xy*, para que se induzca en esta una fuerza electromotriz constante? ¿Qué sentido tendrá la corriente inducida en la espira? Justifica tu respuesta.**

a.


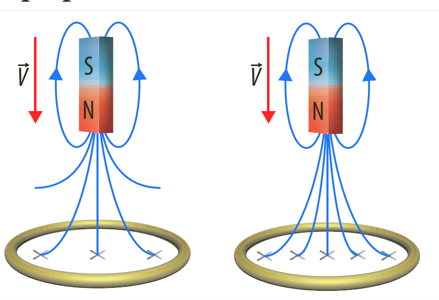
c.


b.


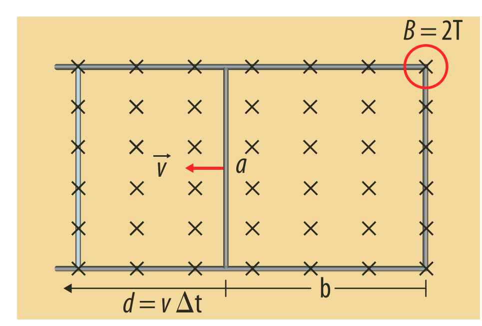
Problemas básicos

9. **En el interior de un campo magnético constante de 0,8 T se encuentra un conjunto de 10 espiras rectangulares de área 0,01 m^2. Calcula entre qué valores oscilará la fuerza electromotriz inducida cuando la espira se haga girar con una velocidad angular en rad/s.**

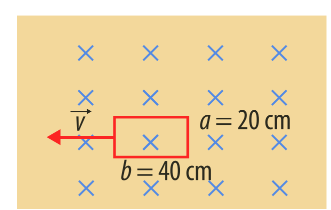
10 **En la figura, cada línea de fuerza representa un campo magnético de intensidad 0,2 T y el área del conjunto de 10 espiras es de 0,02 m^2. Si el imán se acerca a la espira y se desplaza desde *C* hasta *D* en 0,2 s, calcula la intensidad de corriente que se origina si la resistencia de los cables es de 0,1 V. Considera que las líneas ingresan perpendicularmente.**



11 **Una varilla de aluminio de 0,4 m se mueve con velocidad constante de 10 cm/s dentro de un campo magnético entrante a la hoja de 2 T, como muestra la figura. Calcula la fuerza electromotriz inducida.**

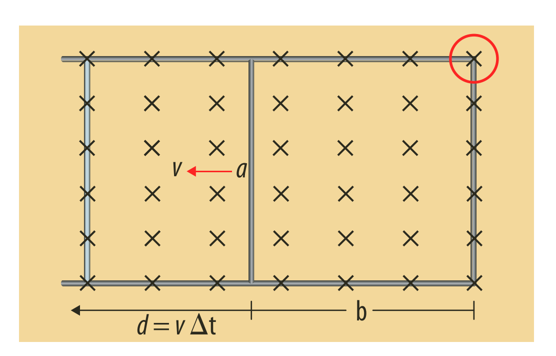


12 **Un circuito rectangular de 100 espiras de 20 cm de ancho y 40 cm de largo, está situado en un campo uniforme de 0,8 T, como se muestra en la figura. Si la espira es retirada del campo con una velocidad de 2 m/s, calcula la intensidad de corriente, si se sabe que el circuito tiene una resistencia de 200 Ω.**



13 **En el interior de un generador tenemos 200 espiras de área máxima 0,01 m^2 expuestas al campo magnético de 2 T. Calcula entre qué valores oscilará la fuerza electromotriz inducida cuando la espira se haga girar con una velocidad angular de 6π rad/s.**

14 **Una varilla conductora de 0,2 m se mueve con velocidad constante de 20 cm/s dentro de un campo magnético saliente de la hoja, de intensidad igual a 4 T. Calcula la fuerza electromotriz inducida.**



Problemas de profundización

15 **Una bobina cuadrada y plana de 25 cm^2 de superficie construida con cinco espiras está en el plano *xy*.**

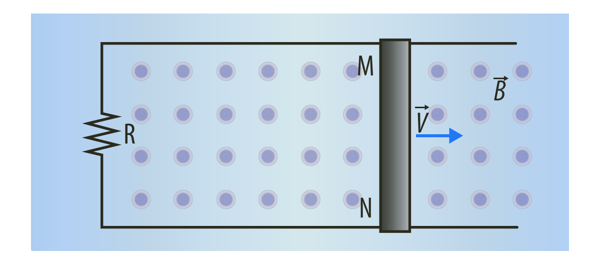
a. Calcula la fem inducida si se aplica un campo magnético en la dirección del eje *z* que varía de 0,5 T a 0,2 T en 0,1 s.

b. Calcula la fem inducida si el campo permanece constante de 0,5 T y la bobina gira hasta colocarse en el plano *xz* en 0,1 s.

16 **En el circuito de la figura la varilla *MN* se mueve con una velocidad constante de valor $v = 2$ m/s en dirección perpendicular a un campo magnético uniforme de valor 0,4 T. Sabiendo que el valor de la resistencia *R* es 60 Ω y que la longitud de la varilla es 1,2 m.**

a. Determina la fuerza electromotriz inducida y la intensidad de la corriente que circula en el circuito.

b. Si a partir de un cierto instante ($t = 0$) la varilla se frena con aceleración constante hasta pararse en 2 s, determina la expresión matemática de la fuerza electromotriz inducida en función del tiempo, en el intervalo de 0 a 2 s.



Dirección del campo magnético terrestre

En esta práctica estudiaremos la relación entre la corriente eléctrica que circula por una bobina y el cuerpo magnético generado por esta. También estudiaremos cómo se produce una corriente eléctrica por medio de un campo magnético variable. A partir de la relación entre la corriente eléctrica y el campo magnético que esta produce, determinaremos la componente horizontal del campo magnético terrestre.

Conocimientos previos

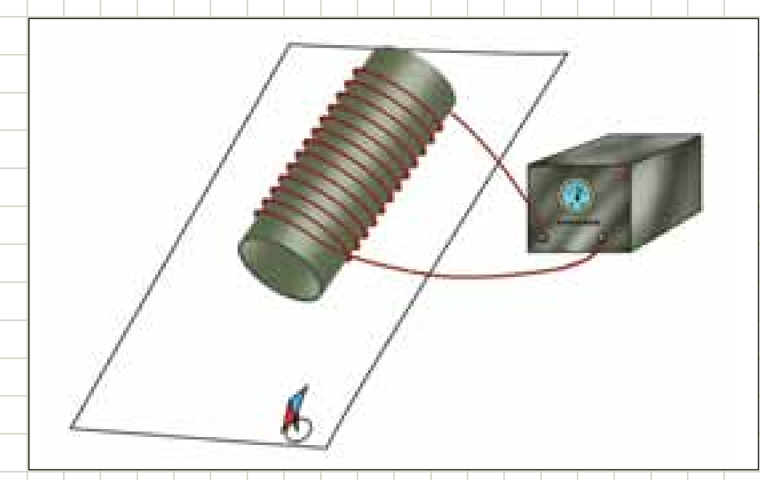
Campo magnético y corriente eléctrica.

Materiales

- Fuente aguja imantada (brújula)
- Dos cables conductores
- 6 metros de cable de cobre para embobinar No. 22
- Cilindro hueco de cartón
- Lámina de madera

Procedimiento

1. Para construir una bobina enrolla alrededor del cilindro hueco unas 40 espiras del alambre de cobre para embobinar.
2. Coloca la bobina sobre la lámina de madera. Al frente de uno de los extremos de la bobina coloca la aguja imantada. Describe lo que observas.
3. Conecta los terminales de la bobina a la fuente, como se ve en la figura. Describe lo que sucede con la aguja imantada.
4. Invierte el sentido de la corriente en la bobina. Describe lo que sucede con la orientación de la aguja imantada.
5. Coloca la aguja imantada en diferentes posiciones con respecto a la bobina y repite la experiencia.



Análisis de resultados

1. Describe cualitativamente el campo magnético producido por la bobina.
2. Compara el campo magnético producido por la bobina con el campo magnético producido por un imán recto.
3. Explica los cambios producidos en la aguja imantada cuando inviertes el sentido de la corriente de la bobina.
4. Verifica la dirección del campo magnético a partir de la regla de la mano derecha.

Inducción electromagnética

Muchos científicos coinciden en que la tecnología eléctrica nació gracias al descubrimiento de la inducción electromagnética. Este fenómeno consiste en usar campos magnéticos variados para producir una corriente eléctrica. Esta corriente es una corriente inducida y es alterna porque oscila de un lado a otro. En esta práctica se desea determinar la dirección de una corriente a través de un conductor cuando un campo magnético varía a través de él.

Conocimientos previos

Campos magnéticos y uso del galvanómetro.

Materiales

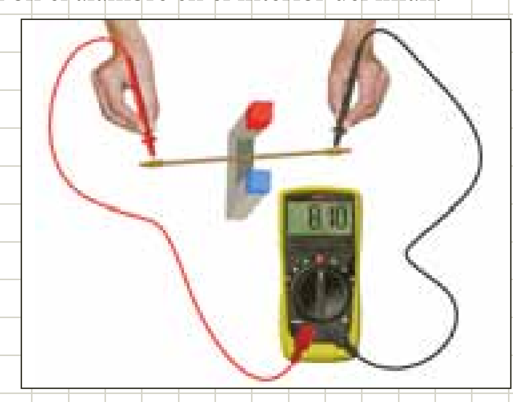
- Imán
- Alambre conductor
- Galvanómetro

Procedimiento

1. Conecta las terminales del galvanómetro a los extremos del alambre.



2. Pon el alambre en el interior del imán.



3. Mueve verticalmente el alambre a través del imán y observa la variación de los valores que registra el galvanómetro. Escribe la observación en la siguiente tabla.

Tabla de registro

Movimiento del alambre	Observación
Hacia abajo	
Hacia arriba	
Rápido hacia abajo	
Rápido hacia arriba	

4. Mueve nuevamente el alambre verticalmente, pero con mayor rapidez. Observa la variación de la medida señalada en el galvanómetro y escribe la observación en la tabla de registro.

Análisis de resultados

1. Explica por qué el galvanómetro registra una corriente si no hay ninguna pila conectada en el alambre.
2. Si movemos con mayor rapidez el alambre a través del imán, ¿qué podemos decir respecto a la corriente que registra el galvanómetro? Justifica tu respuesta.
3. Si utilizamos los dedos pulgar, índice y corazón, de la mano derecha para indicar el movimiento del alambre, la corriente inducida y la dirección del campo magnético del imán, ¿cuál sería la regla que me permitiría presidir el comportamiento del alambre a partir de la dirección de la corriente y el campo magnético del imán?

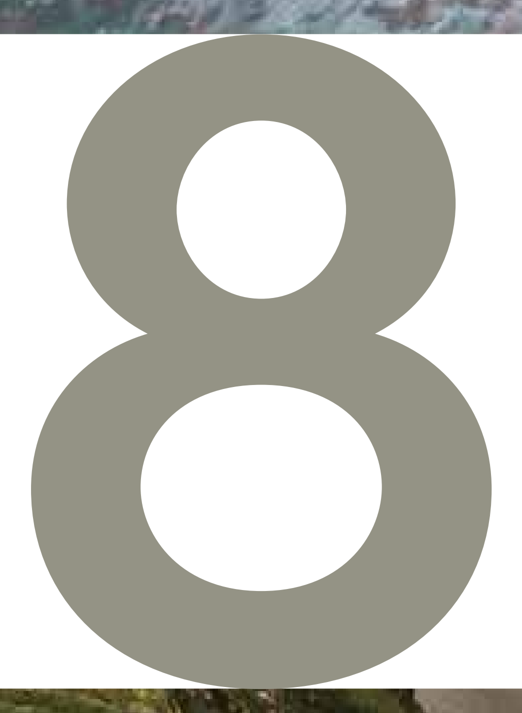
Levitación magnética en los automóviles

Aunque parece extraído de una película de ciencia ficción, ver vehículos que leviten sobre las carreteras no es algo que esté fuera de nuestro alcance. Todo se debe al avance tecnológico de la levitación magnética que en la actualidad ha conseguido hacer levitar algunos de los objetos más pesados de la naturaleza. Grandes empresas encargadas de la fabricación de vehículos ya inician su trabajo con prototipos que funcionan gracias a la levitación magnética aportando, de esta manera, al cuidado del medio ambiente al fabricar vehículos menos contaminantes.

Los principios utilizados en los vehículos son la propulsión y la levitación. La propulsión magnética consiste en generar campos magnéticos, uno en el vehículo y otro en la pista, donde el campo magnético del vehículo sigue al de la pista. La levitación permite reducir al mínimo la fricción entre el vehículo y la pista, haciendo menor el ruido generado, y permite alcanzar velocidades más altas con menos gasto de energía.




BMW desarrolló el Mini E, el cual utiliza una serie de imanes en algunas partes móviles y fijas del vehículo. La única energía que necesita este prototipo es el de la batería para arrancar el vehículo.
MINI
El Peugeot ELA es un diseño sin ruedas y es un nuevo concepto en automóviles con potentes imanes que eliminan la fricción con la autopista. Aunque es necesario que en las vías también haya sistemas de imanes para que funcione, el Peugeot ELA es totalmente sostenible ya que cuenta con paneles solares en el techo para alimentar su motor eléctrico.
El Nissan 400-C Motivity fue diseñado por Tryi Yeh y está acondicionado con un sistema maglev (levitación magnética) en cada una de sus ruedas.



Física moderna

Temas de la unidad

1. Relatividad
2. Física cuántica
3. Estructura nuclear



Para pensar…

A finales del siglo XIX se creía que gran parte de los problemas de la física ya estaban resueltos, puesto que existían teorías adecuadas y un alto grado de ordenamiento científico e intelectual. Las leyes de Newton para la dinámica y las ecuaciones de Maxwell para los fenómenos electromagnéticos permitían explicar satisfactoriamente todos los fenómenos conocidos.

Sin embargo, el cambio de siglo presentó fuertes modificaciones en la concepción de la naturaleza, entendida hasta entonces como un conjunto regular y ordenado, situado en coordenadas espaciales y temporales inalterables. La revolución tecnológica de la época llevó al ser humano a centrar su atención en un campo inexplorado: el mundo microscópico.

Las nuevas concepciones remplazaron las teorías de la física clásica. Los cambios en las concepciones del espacio y el tiempo modificaron sustancialmente la forma de ver el universo; el desarrollo de la física atómica y nuclear ocasionó drásticos cambios en el desarrollo tecnológico e histórico del mundo, generando modelos cada vez más elaborados de los fenómenos naturales.

En esta unidad estudiaremos la estructura atómica, los procesos que ocurren en el interior del núcleo atómico y sus aplicaciones en nuestra vida. Además, revisaremos los principales descubrimientos que revolucionaron la física clásica dando origen a los grandes avances en el conocimiento científico que caracteriza la física contemporánea.

Para responder…

- ¿Qué aplicaciones conoces de la física atómica y de la física nuclear?
- ¿Cuáles son las principales partículas que componen el átomo?

1. Relatividad

1.1 Antecedentes

1.1.1 El problema del movimiento

Probablemente en alguna ocasión, al encontrarte en el interior de un vehículo que se detiene frente a un semáforo, observas que el vehículo que se encuentra a tu lado comienza a moverse hacia delante, pero luego, percibes que el vehículo en el que viajas frena repentinamente.

La verdad es que siempre tuviste razón, desde tu marco de referencia el auto del carril contiguo se estaba moviendo. Sin embargo, desde el marco de referencia de la Tierra, es decir, del observador que se encontraba en el otro auto, el vehículo en el que te encontrabas era el que se movía.

Los primeros marcos de referencia inerciales fueron definidos por Galileo, quien había propuesto que era imposible determinar si un sistema está en reposo o experimenta movimiento uniforme, a partir del movimiento de los objetos que hay dentro del mismo sistema.

Newton en su obra *Principia* definió el reposo como un estado relativo del movimiento. Para la mecánica newtoniana no es relativa la aceleración, la fuerza ni la masa, pero los movimientos uniformes sí lo son.

Por ejemplo, si un objeto cae del techo de un bus que se mueve con velocidad constante, la posición, trayectoria y velocidad que observa una persona que se encuentra en el interior del bus es muy diferente a la observación que tiene una persona que se encuentra fuera de él.

Para la persona que se encuentra en el interior del bus, el objeto describiría una trayectoria vertical, mientras que para la persona que está afuera, la trayectoria del objeto sería parabólica, tal como se observa en la siguiente figura.





En la concepción newtoniana existe una idea de espacio y tiempo absoluto:

- El **espacio absoluto** es un "contenedor" de todas las cosas, independiente de ellas. Este espacio se encuentra en reposo absoluto, y se ubica en el sistema de referencia en el que se verifican las tres leyes de Newton.

  Además, este espacio es infinito y homogéneo, lo cual significa que es igual en todas partes. En su libro, Newton escribió: *"El espacio absoluto por su naturaleza, sin relación con nada exterior, permanece siempre idéntico e inmóvil"*.

- El **tiempo absoluto** transcurre por igual en todo lugar del espacio, sin ser afectado por la presencia de cuerpos o interacciones. Este tiempo absoluto permite afirmar que el "ahora" tiene un sentido universal y, por tanto, dos eventos que ocurren en el mismo tiempo y en dos lugares distintos son simultáneos sin importar dónde se les observe. Sin embargo, no existe ningún observador capaz de medir este tiempo, ni de determinar la existencia de un espacio inmóvil. Al respecto, Newton indicó: *"El tiempo absoluto verdadero y matemático, en sí mismo y por su propia naturaleza, corre igualmente sin relación con nada exterior"*.



Figura 1. Según la concepción newtoniana, el tiempo transcurre por igual en cualquier lugar del universo.

En el siglo XIX el fenómeno electromagnético fue el quehacer de los físicos, y a diferencia de la mecánica newtoniana, todo el desarrollo electromagnético se dio a partir de la experimentación; las leyes y las reglas eran empíricas en su totalidad, hasta que finalmente Maxwell en sus cuatro ecuaciones reunió el fenómeno como hecho ondulatorio y electromagnético dentro de las concepciones newtonianas, acogiendo el éter como la sustancia que llenaba el espacio absoluto y en el que se propagaban las ondas electromagnéticas.

Los físicos de la época, como Ernest Mach, refutaron las ideas del espacio y el tiempo propuestas por Newton, por lo cual estos conceptos empezaron a tener otra connotación.

Para Mach el espacio absoluto y el movimiento absoluto son constructos mentales que no se presentan en realidad, pero sirven para organizar el mundo de las sensaciones. La sensación es el punto de partida que se da por supuesto como la evidencia misma, la realidad está para construirse y no está dada en sí.

Ernest Mach (1838-1916) escribió sus reflexiones en la obra *Análisis de las sensaciones,* la cual publicó en 1885. Esta obra fue de gran influencia para Albert Einstein, quien más adelante formuló la teoría de la relatividad.

1.1.2 El éter y la propagación de la luz

Durante el siglo XIX era aceptada la idea de que la luz era un fenómeno ondulatorio; de esta manera todas las propiedades de las ondas eran válidas en el caso de la luz. Las ondas que pueden observarse habitualmente a nivel macroscópico son perturbaciones de algún medio material: las ondas sonoras son oscilaciones de las moléculas del aire, las ondas en un estanque son oscilaciones de las moléculas del agua, etc. Por este motivo, resultó natural suponer que existía un medio material necesario para la propagación de las ondas de la luz. A este medio se le llamó **éter**.

El éter, en caso de existir, debía tener propiedades muy particulares:

- ser suficientemente tenue para llenar todos los espacios, incluso el interior de los cuerpos transparentes o traslúcidos, y
- ser suficientemente rígido para poder transmitir ondas de altísima frecuencia como las de la luz.

El éter se consideraba como un sistema de referencia absoluto inmóvil con respecto al cual se movían todos los otros cuerpos. Así, esta teoría del éter inmóvil coincidía con el espacio absoluto de Newton, como la luz se propagaría a velocidad c en el éter estacionario, desde un cuerpo en movimiento, como la Tierra, se vería que la luz se mueve a distintas velocidades según lo haga en la misma dirección del movimiento terrestre, en sentido contrario o perpendicularmente.

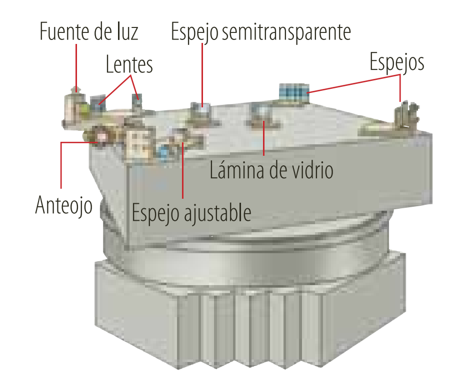


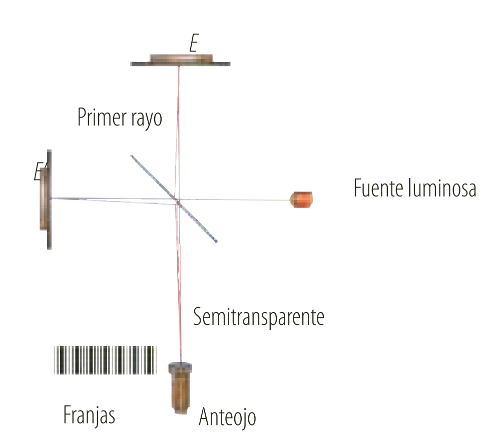
Figura 2. Interferómetro de Michelson para medir la velocidad de la Tierra con respecto al éter.

En 1887 el físico Albert A. Michelson diseñó un interferómetro, con el químico Edgard W. Morley, para determinar la velocidad de la tierra con respecto al éter. Con su experimento debían mostrar inicialmente la diferencia en las velocidades, vistas desde la Tierra, de dos rayos que se movían en direcciones diferentes. Ellos usaron dos rayos provenientes de la misma fuente (para asegurar la coherencia), y luego de desplazarse en direcciones perpendiculares, se los hacía interferir.

La clave del experimento residía en que el patrón de interferencia debía cambiar si se rotaba el aparato con respecto a la dirección del movimiento de la Tierra.

El aparato original tenía muchos espejos para aumentar el camino recorrido por los rayos hasta unos 10 m, y así aumentar el efecto de interferencia. El dispositivo descansaba sobre una gran piedra que flotaba en mercurio (figura 2).

El interferómetro permitía medir distancias y velocidades con enorme precisión, debido a la utilización de haces de luz en interacción. El experimento consistía en dividir, mediante un espejo semitransparente, un haz luminoso en dos haces perpendiculares, que se reflejaban en dos espejos, *E'* y *E*, para volver a unirse, tal como se observa en la siguiente figura.



Ellos esperaban que una de las partes del rayo viajara en la dirección de la velocidad absoluta de la Tierra y la otra perpendicular a ella, de tal forma que un rayo invirtiera mayor tiempo que el otro y así se produjera una interferencia.

Sin embargo, estas interferencias jamás se registraron, por lo cual se empezó a conjeturar sobre las propiedades mecánicas del éter, surgiendo así teorías como la del arrastre del éter, debido al movimiento de la Tierra.

1.2 Postulados de la teoría de la relatividad

La existencia del éter era importante para que el electromagnetismo fuera coherente con la mecánica newtoniana y, con ello, con una visión de espacio absoluto, dicha existencia resultaba poco relevante para una concepción del espacio. Las posiciones espaciales se reconocen en virtud de la afectación de nuestra retina, o en virtud de los aparatos ópticos de medida, o de otra clase, siendo entonces el espacio una construcción mental y no algo dado, existente en sí o *a priori*.

La influencia de Mach en los jóvenes físicos a comienzos del siglo XX desató una nueva teoría que cambiaría profundamente las bases de la física: la **teoría de la relatividad** propuesta por Albert Einstein.

1.2.1 Primer postulado

Si una persona que se encuentra en el interior de un tren, que se mueve con velocidad constante respecto a la Tierra, se pusiera a jugar billar no notaría ninguna diferencia respecto al juego que realizaría estando en el suelo en reposo, ya que los ángulos y las velocidades en las colisiones de las bolas de billar no son afectados en absoluto. Si no fuese por las ventanas que permiten ver el exterior, nunca podría discernir si se encuentra en movimiento o en reposo.

Todas la leyes de la mecánica de Newton son válidas en los sistemas inerciales de referencia, que son aquellos que se mueven con velocidad constante respecto de algún otro sistema inercial (libre de fuerzas) tomado como referencia. Este principio se conoce como **principio de la relatividad de Galileo**.

Posteriormente, Einstein generalizó este principio de la equivalencia entre el movimiento uniforme y el reposo al afirmar que todas las leyes de la física tendrían la misma expresión matemática en todos los sistemas inerciales.

La firme creencia de este principio por parte de Einstein provenía del hecho de que al no existir campos de fuerza (gravitacionales, eléctricos, etc.), no podía haber una dirección ni un punto privilegiado en el espacio. Esta homogeneidad del espacio libre de fuerzas significa que el resultado de cualquier experimento no depende del lugar en que se realice.

Por tanto, el movimiento de un cuerpo solo puede ser determinado por observadores de otro sistema de referencia, los que a su vez están en movimiento respecto de ese cuerpo.

Debido a esta relatividad del movimiento, Einstein pensó que ningún experimento podría revelar el movimiento uniforme, aunque se usaran rayos de luz, dispositivos electrónicos o magnéticos. Para ello, formuló el primer postulado de la relatividad.

Definición

Las leyes de la física son las mismas en todos los marcos de referencia inerciales.

Este postulado elimina la posibilidad de movimiento absoluto. Lo único que podemos saber de un objeto es si está en movimiento relativo con relación a otro objeto.

1.2.2 Segundo postulado

Seguramente alguna vez habrás observado las situaciones mostradas en la figura.







Para un observador situado fuera de la escalera, las situaciones presentadas tienen las siguientes características:

- Cuando la persona se mantiene sobre el peldaño, sin moverse, avanza a la misma velocidad de la escalera eléctrica, debido a que su velocidad respecto a las paredes de la escalera es nula.
- Si la persona avanza en el mismo sentido que la escalera eléctrica, su velocidad se sumaría a la de la escalera, debido a que cuando la persona sube por los escalones, su velocidad relativa respecto a la escalera aumenta.
- Si la persona se mueve en sentido contrario a la dirección de la escalera, su velocidad final es la resta de las dos velocidades, ya que la velocidad relativa de la persona respecto a la escalera disminuye.

Nuestro sentido común nos lleva a pensar que lo anterior debería ser aplicable a cualquier movimiento, incluso al de un haz de luz. Sin embargo, cuando Michelson y Morley midieron la velocidad de la luz acercándose y alejándose de la fuente, se sorprendieron al observar algo totalmente distinto a lo que habían esperado intuitivamente, ya que la velocidad de la luz resultó ser siempre la misma y su valor no dependía del movimiento de la fuente ni del receptor.

Michelson y Morley repitieron varias veces el experimento, llegando siempre a los mismos resultados, determinando que la velocidad de la luz en el vacío alcanzaba un valor aproximado de 300.000 km/s, independientemente del sistema de referencia usado.

Este hecho le permitió a Einstein determinar su segundo postulado de la teoría de la relatividad.

Definición

La velocidad de la luz es independiente del estado de movimiento de la fuente que la emite.

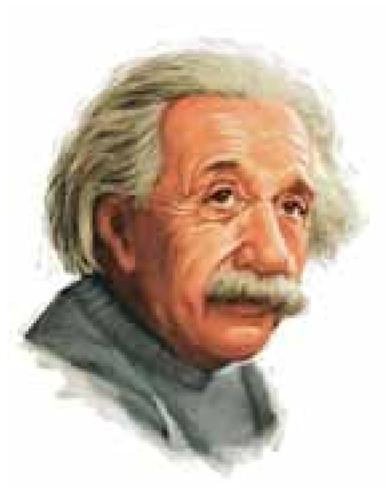
Estos dos postulados unifican el espacio y el tiempo, determinando de esta manera que los objetos se mueven en el espacio-tiempo.

La teoría de la relatividad, presentada por Einstein en 1905 y denominada como especial o restringida, no solo hace ver que el movimiento es relativo sino que muestra que existen cosas tan invariables como las leyes de la física, que son las mismas en todos los sistemas de referencia donde se verifica la inercia, y que la velocidad de la luz en el vacío es constante, independientemente del sistema de referencia.

Esta teoría especial de la relatividad obligó a revisar los principios de la mecánica clásica, de manera que se empezara a contemplar en sus ecuaciones la velocidad de la luz como un factor muy importante, que incluso puede hacer variar la medida del tiempo entre dos sistemas distintos de referencia.

Por ejemplo, para la mecánica clásica, si un auto se encuentra en movimiento, la luz de los focos delanteros debería tener una velocidad mayor que la de los traseros, ya que la velocidad del automóvil y la de la luz se sumarían.

Sin embargo, se demostró que la luz tiene siempre la misma velocidad, sin importar la dirección que se mida.



Albert Eisnstein postuló la teoría de la relatividad en 1905.

1.3 La simultaneidad es relativa

Para Einstein, los juicios en que interviene el tiempo son siempre juicios referentes a sucesos simultáneos. Por ejemplo, decir que los estudiantes llegaron a las siete significa que, en el momento en que el reloj marcó las siete llegaron los estudiantes. El sustituir el tiempo por la posición de las manecillas del reloj, está definiendo el tiempo exclusivamente para el lugar en donde está situado el reloj, pero esa definición no se acomoda cuando tenemos que conectar en el tiempo una serie de eventos que ocurren en diferentes lugares, o para evaluar los tiempos de eventos que ocurren en lugares remotos en donde se encuentra ubicado el reloj.

Por ejemplo, supongamos que en el vagón de un tren que se mueve hacia la derecha con velocidad v, se producen dos destellos simultáneos en cada uno de sus extremos (figura 3).

En el marco inercial del vagón (figura 3a), las lámparas adosadas en su interior se encienden simultáneamente y los rayos luminosos emitidos por ambas llegan al mismo tiempo a un observador, ubicado en el vagón.

En el marco inercial de un observador situado fuera del vagón (figura 3b), este percibe que la lámpara de la derecha se enciende primero.

Ahora bien, para llegar a coordinar en el tiempo dos o más acontecimientos remotos que se dan en lugares diferentes es imprescindible disponer de dos o más relojes sincronizados.

De esta manera, si un rayo luminoso parte de A en t_A y retorna en t'_A después de reflejarse en t_B, los dos relojes situados en A y B están, por definición, sincronizados si:

$$t_B - t_A = t'_A - t_B$$

El criterio de sincronización de Einstein para un conjunto R_S de relojes consiste en establecer una relación de equivalencia en el conjunto del modo siguiente: el reloj R_1 está sincronizado con el reloj R_2 si para una señal que partiendo del reloj, R_1, en el instante t_A, se refleja en el segundo reloj, R_2, y regresa al reloj R_1 en el instante t_B, se verifica que el tiempo medido en el reloj R_2 en el momento de recibir la señal procedente de R_1 es:

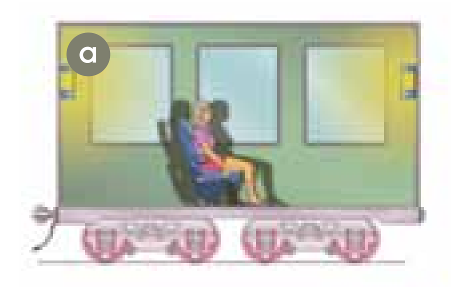
$$\frac{(t_A + t_B)}{2}$$

Ahora, cuando se da un intervalo temporal entre dos sucesos que tienen lugar en un sistema, se le denomina **propio**, si para su medición es suficiente un solo reloj asociado al sistema de referencia desde el cual se hace la medición.

Por otra parte, se dice que es **impropio** si el intervalo temporal necesita dos relojes sincronizados asociados al sistema desde donde se hace la medición.

Por otra parte, la sincronización de los relojes presenta una contradicción si dos sucesos que tienen lugar en un sistema reciben una idéntica información emitida por relojes que están respectivamente en reposo y en movimiento con respecto al sistema en cuestión: dos relojes sincronizados en un sistema no lo están en otro.

En conclusión, si los observadores tienen diferentes estados de movimiento, también tienen diferentes definiciones de simultaneidad para los acontecimientos remotos.



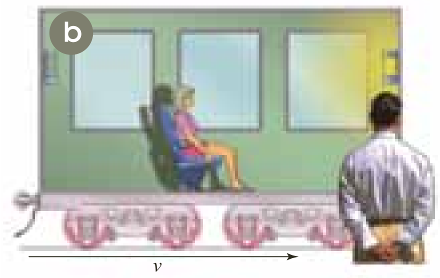


Figura 3. Los rayos luminosos emitidos por las lámparas son sucesos simultáneos para el observador dentro del vagón, pero no para el observador que se encuentra fuera de él.

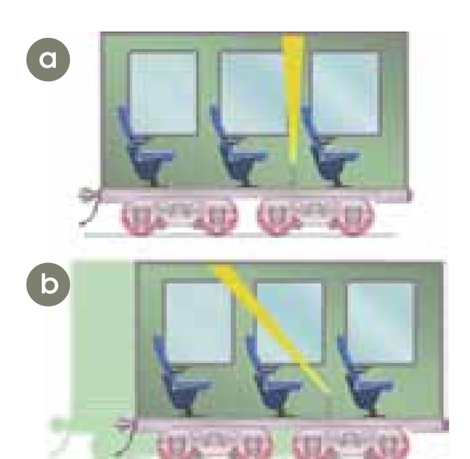


Figura 4. El tiempo que tarda el rayo luminoso en hacer el recorrido es menor para quien va en el tren, por lo tanto para él, el tiempo transcurre más lentamente que para un observador en tierra.

1.4 Tiempo y longitud en la teoría de la relatividad

1.4.1 Dilatación del tiempo

Considerando los planteamientos de la teoría de la relatividad, cuanto más se aproxima la velocidad de un cuerpo en movimiento a la velocidad de la luz, más se extiende el tiempo para ese cuerpo. Este fenómeno se conoce como dilatación del tiempo.

Supón un tren que puede viajar a una velocidad v, aproximada a la de la luz. En el interior del tren se encuentra una linterna, en el piso, que emite un rayo de luz hasta el techo (figura 4a). La distancia recorrida por este rayo vista por un observador que viaja en el tren es:

$$d_0 = c \cdot t_0$$

Donde t_0 es el tiempo que tarda la luz en ir desde el suelo hasta el techo en línea recta, medido por un reloj que está en el tren y c es la velocidad de la luz.

Un observador que se encuentra situado fuera del tren observará el rayo de luz de la linterna con una trayectoria diagonal (figura 4b), cuya distancia es:

$$d = c \cdot t'$$

Donde t es el tiempo que tarda el rayo de luz en llegar al techo, medido por un reloj situado fuera del tren. La figura 5 muestra la trayectoria para el recorrido de la luz. Como $d > d_0$ entonces $t > t_0$. Es decir, para la persona que se encuentra en el interior del tren el tiempo transcurre más lentamente que para el observador fijo en tierra. Al aplicar el teorema de Pitágoras en el triángulo rectángulo obtenemos:

$$(c \cdot t')^2 = (v \cdot t')^2 + (c \cdot t_0)^2$$

$$c^2 \cdot t'^2 = v^2 \cdot t'^2 + c^2 \cdot t_0^2 \qquad \textit{al resolver las potencias:}$$

$$t'^2(c^2 - v^2) = c^2 \cdot t_0^2 \qquad \textit{al factorizar:}$$

$$t'^2 = \frac{c^2 \cdot t_0^2}{(c^2 - v^2)} \qquad \textit{al despejar } t'^2$$

$$t'^2 = \frac{t_0^2}{\frac{(c^2 - v^2)}{c^2}} \qquad \textit{al simplificar } c^2.$$

Al despejar t' obtenemos la expresión del tiempo para un suceso visto desde un marco de referencia diferente al marco de referencia donde sucede el evento en términos del tiempo propio.

$$t' = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Si

$$t' = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \cdot t_0$$

entonces, la ecuación anterior la escribimos:

$$t' = \gamma \cdot t_0$$

Donde γ se conoce como el factor de Lorentz.

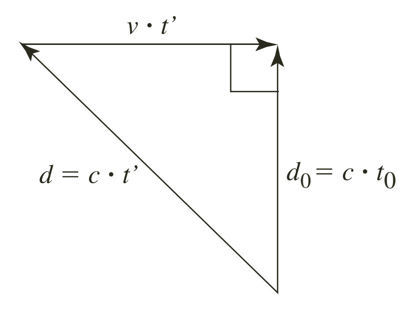


Figura 5. Desplazamiento resultante del rayo luminoso, aplicando el teorema de Pitágoras.

EJEMPLO

La estrella más cercana a nuestro sistema solar es Alfa Centauro, que se encuentra a 4,3 años luz de la Tierra. Esto significa que su luz tarda 4,3 años en llegar hasta nosotros. Si una nave espacial viajara a esa estrella, ida y vuelta, con una rapidez de 0,9 · *c*:

a. ¿Cuánto tardaría la nave según los relojes de la Tierra?

b. ¿Cuánto tardaría la nave según sus propios relojes?

Solución:

a. Los relojes de la Tierra medirían un tiempo de:

$$t = \frac{d}{v} = \frac{2(4{,}3 \text{ año luz})}{0{,}9 \text{ (años luz/años)}} = 9{,}55 \text{ años}$$ *Al calcular*

b. Los relojes de la nave medirían un tiempo t_0 dado:

$$9{,}55 \text{ años} = \frac{t_0}{\sqrt{1 - (0{,}9 \cdot c/c)^2}} \Rightarrow t_0 = 4{,}16 \text{ años}$$ *Al remplazar y calcular*

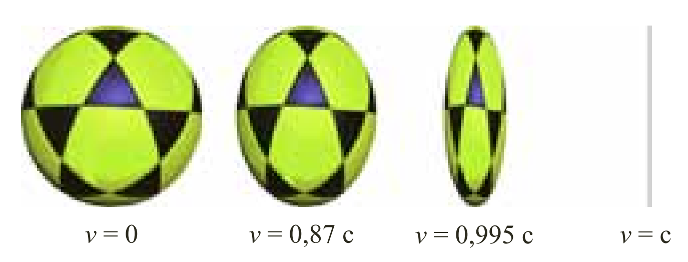
1.4.2 Contracción de la longitud

El efecto de dilatación del tiempo produce distintos efectos sobre los objetos que se desplazan a altas velocidades. Uno de ellos es la **contracción de la longitud**. Para un observador externo, un cuerpo en movimiento a una velocidad cercana a la de la luz parece contraerse en la dirección del movimiento.

Einstein concluyó que el coeficiente de contracción de la longitud es:

$$L' = L_0 \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Este efecto se conoce como la contracción de Lorentz, donde v es la velocidad relativa entre el observador y el objeto observado, c la velocidad de la luz, L_0 la longitud del objeto medida en reposo y L' la longitud del objeto medida en movimiento. De este modo, si un observador O' ve una pelota con velocidad v, tal que $v = 0$, la observa como se muestra en la siguiente figura.



Si la pelota se mueve horizontalmente tal que $v = 0{,}87 \cdot c$ se contrae a la mitad; si $v = 0{,}995 \cdot c$ se contrae a la décima parte de la longitud inicial y si su velocidad llegara a ser igual a c, su longitud sería cero. Esta es una de las razones por las que se afirma que c es el límite superior de la rapidez de un objeto.

Aunque la teoría sea muy coherente, podría asaltarnos la duda de si realmente ocurren la dilatación del tiempo y la contracción de la longitud. Experimentalmente se ha comprobado que los relojes en movimiento marchan más despacio, al estudiar la desintegración de partículas inestables que se mueven a velocidades cercanas a c.

Es posible medir qué fracción de una muestra de ellas, observadas por primera vez en un instante t_0, sobreviven todavía en un instante posterior t en reposo con respecto a la Tierra.

Por ejemplo, los muones, que son partículas cargadas, provenientes de la desintegración de otras partículas llamadas piones, se encuentran en la atmósfera y al desintegrarse dan lugar a un electrón, un neutrino y un antineutrino. Si 563 muones por hora llegan a la cima de una montaña de 2.000 m de altura y se mueven con una velocidad de $0,994 \cdot c$, se espera que al alcanzar el nivel del mar solo lleguen 25 muones por hora. Sin embargo, al llevar a cabo la medida se encontró que podían contarse más de 400 muones por hora. El tiempo promedio que gastaron los muones en llegar al nivel del mar fue 6,25 μs, pero según el reloj de los mesones (partículas atómicas) el recorrido se efectuó en un tiempo promedio de 0,7 μs, es decir, que la velocidad a la que se mueven sus relojes es 1/9 de la velocidad a la que se moverían si estuvieran en reposo con relación a la Tierra.

EJEMPLO

Para un observador en reposo con respecto a la Tierra, un muón que se mueve con una velocidad de $0,994 \cdot c$ pasa por la cima de una montaña de 2.000 m de altura y llega al nivel del mar en un tiempo de 6,4 μs. Calcular:

a. La longitud de la altura de la montaña recorrida según el muón.

b. El tiempo que registra el reloj del muón para que los extremos de la montaña pasen frente a él.

c. A partir del resultado en el literal b, el tiempo que tarda el muón en caer desde la cima de la montaña hasta el nivel del mar.

Solución:

a. Para el muón la montaña no está en reposo, esta sube frente a él con una velocidad de $0,994 \cdot c$; entonces:

$$L' = L_0 \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$L' = 2.000\ \text{m} \cdot \sqrt{1 - \frac{(0,994 \cdot c)^2}{c}}$$ *Al remplazar*

$L' = 218,76$ m *Al calcular*

La longitud de la altura de la montaña que mide el muón es 218,76 m, es decir, que la altura de la montaña se redujo aproximadamente un 11% de la altura medida en el marco de referencia de la Tierra.

b. Para el muón el intervalo de tiempo que dura la montaña pasando frente a él es:

$$t = \frac{d}{v}$$ *Al despejar t de la ecuación de velocidad constante*

$$t = \frac{218,76\ \text{m}}{0,994 \cdot 3 \times 10^8\ \text{m/s}}$$ *Al remplazar*

$t = 7,34 \times 10^{-7}$ s *Al calcular*

El muón observa que la montaña pasa frente a él durante un tiempo de 0,7 μs.

c. Para un observador en reposo con respecto a la Tierra que conoce la lectura del reloj del muón, se puede calcular el tiempo que tarda el muón en caer desde la cima de la montaña hasta el nivel del mar, así:

$$t' = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$t' = \frac{(0,7 \times 10^{-6}\ \text{s})}{\sqrt{1 - \frac{(0,994 \cdot c)^2}{c^2}}}$$ *Al remplazar*

$t' = 6,4 \times 10^{-6}$ s *Al calcular*

El observador en tierra observa que el muón cae durante 6,4 μs, corroborando la medida dada en el enunciado del problema.

1.4.3 La paradoja de los gemelos

Recordemos que un reloj, además de los comúnmente conocidos, puede ser el tiempo de giro de la Tierra, tu ritmo cardiaco o un grupo de partículas radiactivas. Hemos visto que si uno de estos relojes se mueve a velocidades cercanas a la de la luz (c), sufre un retraso, todo se mueve más lentamente. Desde el primer anuncio de la teoría especial de la relatividad hecho por Einstein en 1905 y publicada en su artículo *Electrodinámica de los cuerpos en movimiento*, muchos físicos, entre ellos Michelson, rechazaron esta teoría. Una de las objeciones que propusieron fue la paradoja de los hermanos gemelos, expuesta por Einstein en su artículo.

Esta paradoja se plantea como un experimento mental, que supone que dos gemelos sincronizan sus relojes y uno de ellos emprende un largo viaje espacial. A su regreso los gemelos comparan sus relojes y se dan cuenta de que el gemelo que ha permanecido en la Tierra es un poco más viejo que el que se ha marchado, tal como se observa en la siguiente figura.





Los contradictores aducían que al tomar como marco de referencia la nave espacial, entonces era el gemelo que estaba en la Tierra quien sufría el atraso del tiempo. Por lo que al encontrarse los dos no revestirían diferencias y, por tanto, la paradoja no se presenta, o bien la teoría de la relatividad no existe. La respuesta a esto es que si la nave siguiera su camino indefinidamente, no habría forma de demostrar el atraso del reloj, pero como la nave tiene que detenerse y dar vuelta para regresar, pasa de un sistema inercial que se aleja de la Tierra a uno que se acerca a la misma. Este cambio va acompañado de enormes fuerzas inerciales que, de hecho, si son muy grandes pueden ocasionar la muerte del astronauta y no la del gemelo que está en la Tierra. La Tierra sigue en el mismo marco inercial con respecto al universo, mientras que la nave no.

EJEMPLO

Un hombre de 40 años se enamora de una mujer de 20 años, pero mantener una relación sentimental les acarrearía muchos problemas a causa de la diferencia de edades. Tal es el amor que hay entre ellos, que él decide realizar un viaje en una nave espacial cuya velocidad es 0,9909 · *c*. Al cabo de dos años regresa a la Tierra. ¿Cuántos años tiene para entonces el amor de su vida?

Solución:

El tiempo propio de la nave es 2 años, por tanto en la Tierra han pasado:

$$t' = \frac{2 \text{ años}}{\sqrt{1 - \frac{(0{,}9909 \cdot c)^2}{c^2}}} = 14{,}85 \text{ años}$$ *Al remplazar y calcular*

Cuando él llega, encuentra que en la Tierra han pasado cerca de 14 años, 10 meses y 13 días. Así que ella tiene 34 años y él 42.

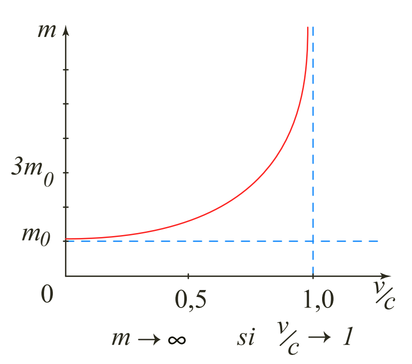


Figura 6. En la gráfica de la masa en función de *v/c*, se observa que cuando *v* tiende a *c*, la masa tiende a infinito.

1.5 Masa y energía

Según la mecánica newtoniana, a un cuerpo se le puede aplicar una fuerza *F* por un tiempo infinitamente grande y entonces la velocidad estará dada por:

$$v = v_0 + \frac{F}{m \cdot t}$$

Esto implica que un cuerpo puede adquirir una velocidad tan grande como se desee, pero según la teoría de la relatividad no es posible que un cuerpo material alcance o supere la velocidad de la luz *(c)*.

A partir de sus postulados y de la conservación de la cantidad de movimiento, Einstein demostró que a velocidades relativistas la masa de un cuerpo varía con la velocidad del mismo. Si m_0 es la masa del cuerpo en reposo a altas velocidades, esta crece si se mueve con velocidad *v* con respecto a un observador, alcanzando una masa *m'* cuya expresión que la define es:

$$m' = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Y en términos del factor de Lorentz, la expresión es:

$$m' = \gamma \cdot m_0$$

Se puede afirmar, de acuerdo con la ecuación anterior, que cuando *v* tiende a tomar el valor de *c*, el denominador tiende a cero y, por tanto, la masa se hace infinita. En la figura 6 se muestra el comportamiento de la masa con relación a *v*/*c*.

Con la mecánica newtoniana hemos aprendido que cuando sobre un objeto actúa una fuerza, esta hace un trabajo que se manifiesta en el aumento de la energía del cuerpo. Esto sigue siendo cierto para velocidades cercanas a *c*, solo que la energía cinética ya no está dada por:

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m_0 \cdot v^2$$

ni por

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

sino por:

$$Ec = (m - m_0) \cdot c^2$$

Y la energía total del cuerpo es:

$$E = m \cdot c^2$$

Si se incrementa la energía potencial de un objeto, este incrementa su masa, por lo cual se puede crear masa al suministrar energía y la masa se puede destruir para suministrar energía; así el cambio en la masa Δm es equivalente al cambio en la cantidad $\Delta m \cdot c^2$.

Cuando un cuerpo se encuentra en reposo su energía cinética es cero y está dada por la expresión $m_0 \cdot c^2$, determinando de esta manera cierta cantidad de energía para la masa en reposo. Se afirma de esta manera que la masa y la energía son equivalentes.

Cuando se produce radiación en la emisión nuclear de un rayo γ, el núcleo disminuye su masa una cantidad $\frac{E}{c^2}$, donde *E* es la energía asociada a la radiación, figura 7.

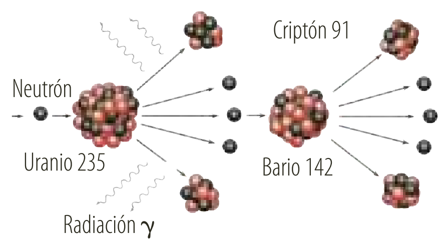


Figura 7. La masa del núcleo disminuye cuando se produce una radiación en la emisión nuclear de un rayo γ.



EJEMPLO

La energía química disponible de una manzana de 100 g es 420 kJ. Comparar esta energía con la energía que se puede obtener al transformar toda la masa en energía.

Solución:

$E = m \cdot c^2$

$E = 0{,}1\ \text{kg} \cdot (3 \times 10^8\ \text{m/s})^2$ *Al remplazar*

$E = 9 \times 10^{15}\ \text{J}$ *Al calcular*

Al comer la manzana únicamente obtenemos, aproximadamente, 5×10^{-11} J de su energía total.

1.6 El principio de equivalencia

Los efectos inerciales como los que ocasionan que los pasajeros de un auto se inclinen hacia atrás en el momento de arrancar, o el abultamiento de la Tierra en la línea del ecuador, al parecer por su rotación, o el comportamiento del agua cuando la cubeta que la contiene está girando, hicieron pensar a Newton que los movimientos acelerados eran movimientos absolutos, en donde las fuerzas inerciales son las que producen estos efectos y, por tanto, no podríamos pensar que es el movimiento del cosmos alrededor de la cubeta, por ejemplo, el que produce los efectos.

Después de la publicación de la teoría especial de la relatividad Einstein pensaba en este tipo de movimientos e intuía que también deberían ser relativos y en 1916 publicó la teoría de la relatividad general, cuyo eje central es lo que se conoce como el principio de equivalencia y que consiste en afirmar que la gravedad y la inercia son lo mismo. Sin embargo, no es que tengan simplemente efectos similares sino que la inercia y la gravedad son dos palabras distintas que designan lo mismo (recordemos el hecho de que al dejar caer en el vacío una piedra y una pluma, desde la misma altura, caen al mismo tiempo; la fuerza de gravedad atrae a la piedra 100 veces más que a la pluma, pero la inercia de la piedra, que se opone al cambio del movimiento, también es 100 veces mayor que la de la pluma).

Este principio de equivalencia hace posible sostener que todo movimiento, incluso el acelerado, es relativo. Por ejemplo, si un ascensor se mueve en el espacio con una aceleración igual a g, las personas que están en su interior sienten el campo gravitacional terrestre. Este ascensor en el que ocurren todos los efectos inerciales puede convertirse en un sistema de referencia fijo en reposo.

En este caso, es el universo entero el que se mueve a velocidad acelerada dejando atrás al ascensor. Este movimiento acelerado genera un campo gravitatorio, que es el responsable de que todos los objetos que hay en el interior del ascensor ejerzan una presión sobre el suelo.

Con base en la descripción anterior, podemos establecer el principio de equivalencia.

Definición

Un observador no puede distinguir si se encuentra en movimiento acelerado respecto a un observador inercial o en reposo en un campo gravitacional uniforme.

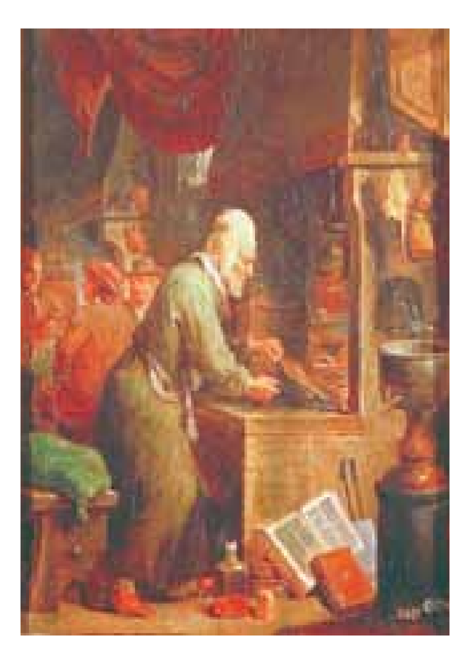


Figura 8. Desde la Antigüedad los científicos planteaban la existencia de una mínima porción de materia llamada átomo.

2. Física cuántica

2.1 El átomo: reseña histórica

La idea de átomo que tenían los estudiosos de la antigüedad era puramente especulativa, es decir, no tenían ninguna prueba empírica de su existencia.

Alrededor del siglo V a.C. ya se debatía sobre la existencia de los átomos. La mayoría de los pensadores sostenían que la materia era continua y que no podía existir ningún vacío en ella, por lo que no aceptaban la existencia de partículas elementales. Sin embargo, otros filósofos como Tales de Mileto, Leucipo y Demócrito, defendían la idea del átomo. Estos filósofos griegos imaginaban que un cuerpo podía dividirse gran número de veces hasta llegar a una porción pequeñísima, indivisible y sin estructura. A esa mínima porción de materia la llamaron átomo, que en griego significa “sin división”.

Por su parte, Demócrito de Abdera indicó que los fenómenos observables en el mundo se podían explicar solo si los objetos se encontraban compuestos de diferentes clases de átomos, cada uno con formas y tamaños propios en movimiento perpetuo. Sin embargo, esta idea se desvaneció a través de la historia debido a los cuatro elementos propuestos por Aristóteles.

Hacia el siglo VII los árabes comenzaron a rescatar las ideas y conocimientos de la Grecia clásica. Posteriormente, los alquimistas intentaron desentrañar la estructura interna de la materia, aunque sin muchos resultados, pues sus métodos eran más bien especulativos.

Alrededor del siglo XV empezaron a surgir nuevas ideas sobre la forma de estudiar la naturaleza. Los planteamientos de Leonardo da Vinci y Francis Bacon abrieron paso a la descripción del método científico de Galileo y de Descartes.

En el siglo XVII, Boyle con sus trabajos de química y Newton con los de física usaron el concepto de átomo. A mediados del siglo XVIII el francés Antoine Lavoisier, con sus investigaciones sobre combustión, identificó sustancias químicas puras que no podían ser separadas de otras y comprobó que la combustión es un proceso en el que el oxígeno del aire se combina con otros elementos.

A comienzos del siglo XIX John Dalton estableció que la materia estaba compuesta por átomos, átomos indivisibles que son iguales en un mismo elemento pero diferentes a los de otro elemento en su tamaño y forma, los cuales no se destruyen sino que se reorganizan en diferentes reacciones químicas. Dalton afirmó que todo compuesto químico estaba formado por moléculas y cada una de ellas estaba formada por un número pequeño y fijo de átomos del mismo elemento o de diferentes elementos.

La idea molecular de Dalton fue corroborada por Joseph Gay-Lussac y usada por el italiano Amadeo Avogadro a fin de deducir que para cualquier temperatura y presión fija, existen volúmenes iguales de gas que contienen el mismo número de moléculas independientemente de la naturaleza química del gas. Por tal razón se desarrolló la descripción matemática del comportamiento de los gases llamada mecánica estadística, la cual fue propuesta por el austriaco Ludwig Boltzman. Sin embargo, no existían evidencias de la realidad del átomo y muchos químicos de la época rechazaron estas ideas, hasta tal punto que llegaron a convencer a Boltzman de que era una teoría personal y sin fundamento. Solo en 1905, con la publicación de Einstein, la realidad del átomo dejó de ser tema de discusión.

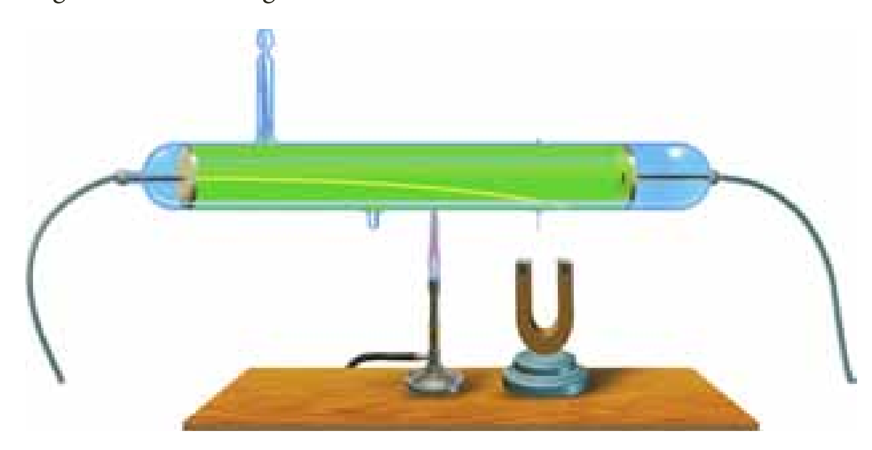
EJERCICIO

¿Actualmente sigue considerándose el átomo como indivisible? ¿Por qué?

2.1.1 El modelo atómico de Thomson

A mediados del siglo XIX muchos científicos estaban dedicados al estudio de fenómenos producidos por el paso de la electricidad a través de los gases. Los experimentos se realizaban en tubos de descarga provistos de dos placas metálicas o electrodos (ánodo y cátodo) selladas en sus extremos y conectadas a altos voltajes; aquellos tubos se denominaron tubos de rayos catódicos.

Sin embargo, en 1897 Joseph Thomson demostró que en un tubo de descarga los rayos catódicos se desviaban por efecto de campos eléctricos y magnéticos, siendo atraídos por el polo positivo, lo cual probaba que su carga eléctrica era negativa.



Como el proceso solo funcionaba con partículas cargadas eléctricamente, sirvió para que Thomson dedujera que los rayos catódicos son partículas cargadas negativamente (electrones) y que cualquier metal que se usara como cátodo producía los mismos efectos. De esta manera, pudo concluir que los electrones son parte de los átomos y que estos son idénticos en los diferentes átomos. Partiendo de la información que tenía hasta el momento, Thomson ideó un modelo atómico en el que la mayor parte de la masa estaba asociada con la carga positiva. Este modelo era relativamente esférico, en el cual se encontraban esparcidas todas las cargas positivas y en su interior aparecen empotrados los pequeños electrones, cada uno con su carga particular (figura 9).

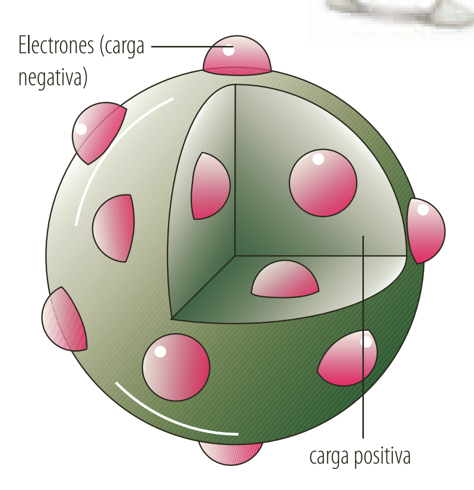


Figura 9. Modelo atómico de Thomson, en el que la carga negativa estaba incrustada en la carga positiva.

2.1.2 La radiactividad

Cuando los rayos catódicos inciden sobre un objeto material, la colisión produce una radiación secundaria invisible que solo puede detectarse por sus efectos luminosos. Esta radiación, descubierta casualmente por Wilhelm Conrad Röntgen, se denominó rayos X.

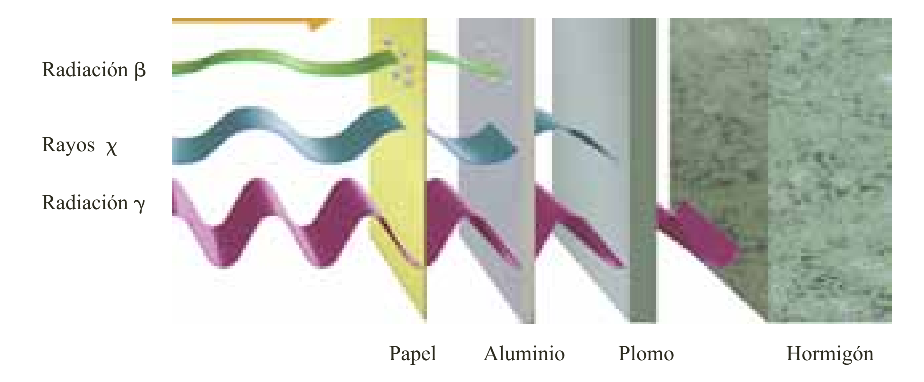
A partir de los hallazgos alcanzados por Röntgen, los físicos empezaron a producir rayos X utilizando otros medios. De esta manera, Henry Becquerel estudió la posibilidad de que la luz solar provocara en algunas sales de uranio la emisión de ciertos rayos penetrantes como los rayos X y que dichos rayos impresionaran una placa fotográfica. Para tal demostración, Becquerel guardó durante varios días sales de uranio junto con placas fotográficas, las cuales al ser reveladas evidenciaron que habían sido impresionadas con gran intensidad. Sin embargo, estas radiaciones no eran idénticas a los rayos X, ya que habían sido emitidas independientemente de cualquier influencia externa y provenían del uranio mismo. De esta manera, Becquerel descubrió la radiactividad natural.

Posteriormente al descubrimiento de Röntgen se sumaron los trabajos realizados por los científicos Marie Sklodowska y su esposo Pierre Curie acerca del uranio. Esta pareja de científicos descubrió, a partir de un mineral de uranio, dos nuevos elementos: el polonio y el radio. Además, dedujeron que este fenómeno estaba asociado a los átomos y que era independiente de su estado físico o químico.

En 1902, Thomson y Soddy demostraron que la radiactividad supone la transformación del elemento radiactivo en otro elemento.

Por otra parte, Ernest Rutherford encontró que existían dos tipos de radiación en esa desintegración radiactiva, denominados rayos alfa y rayos beta. Aunque después determinó la existencia de una nueva emisión, los rayos gamma.

- Los rayos alfa (α) son poco penetrantes, pues son detenidos por una hoja de papel. Consisten en un flujo de partículas, cada una de ellas con dos protones y dos neutrones, los cuales tienen una masa equivalente a cuatro veces la masa del hidrógeno.
- Los rayos beta (β) son más penetrantes que los rayos alfa, aunque son detenidos por una lámina metálica. Consisten en un flujo de electrones.
- Los rayos gamma (γ) son muy penetrantes, para detenerlos se necesita una pared de plomo o concreto (hormigón). Son radiaciones electromagnéticas altamente energéticas, de menor longitud de onda que los rayos χ (entre 10^{-10} m y 10^{-13} m).



El tipo más común de desintegración produce la emisión de partículas beta y ocurre cuando un neutrón presente en el núcleo inestable se convierte en un protón con la emisión de un electrón y de un antineutrino (antipartícula correspondiente del neutrino) o bien cuando, con menor frecuencia, un protón se convierte en un neutrón con la emisión de un positrón (partícula de masa despreciable y carga equivalente a la de un protón) y de un neutrino (partícula subatómica de carga neutra). Estas transformaciones beta se encuentran acompañadas de un cambio de unidad en el número atómico sin cambio en el número de masa.

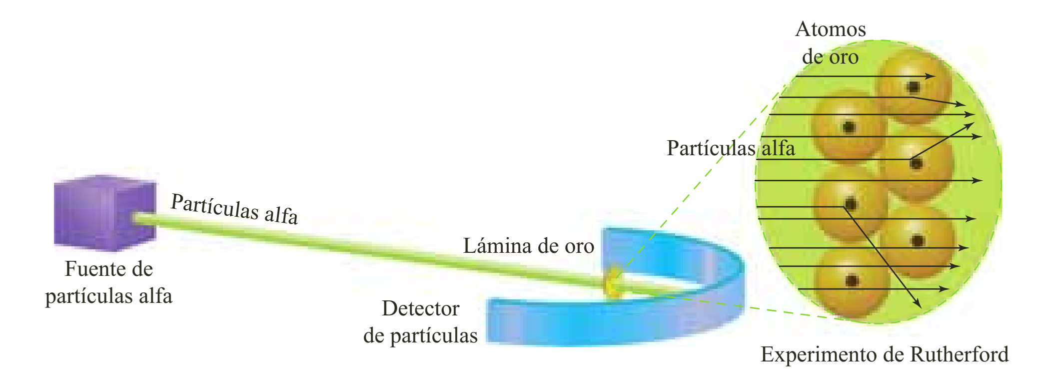
Los estudios han demostrado que la radiactividad se relaciona con la estabilidad nuclear, la cual depende de la proporción entre protones y neutrones que posee un núcleo atómico. En un núcleo estable, la fuerza nuclear y la fuerza electrostática están equilibradas y el elemento no es radiactivo. Si existe un desequilibrio entre la fuerza nuclear y la fuerza electrostática, el núcleo es inestable o activo.



Para alcanzar una configuración más estable, el núcleo emite partículas α o β, o radiación electromagnética γ. Este proceso se conoce como decaimiento radiactivo, aunque también es llamado **desintegración** *o* **transmutación**.

2.1.3 El modelo atómico de Rutherford

En 1911, Ernest Rutherford realizó una experiencia que significó un paso muy importante en el conocimiento acerca del átomo. Esta experiencia consistió en bombardear partículas alfa sobre una lámina de oro, en donde estas partículas atravesaban la lámina y eran recogidas sobre una pantalla de sulfuro de zinc, tal como se representa en la siguiente figura.



Mientras la mayoría de las partículas atravesaban la lámina sin desviarse o siendo desviadas simplemente en pequeños ángulos, algunas partículas eran dispersadas en ángulos bastante grandes, incluso de 180°. El hecho de que solo unas pocas partículas experimentaran desviaciones hizo suponer a Rutherford que las cargas positivas que las desviaban se encontraban concentradas en el interior de los átomos y ocupaban un espacio muy pequeño en comparación con el del átomo. Esta parte del átomo fue denominada núcleo.

Con toda esta información obtenida, Rutherford se dispuso a plantear un nuevo modelo atómico, **el modelo de Rutherford**, en el cual el átomo se encontraba formado por un núcleo central y una corteza (figura 10).

- En el núcleo central se concentra toda la carga positiva y aproximadamente toda la masa del átomo. Este núcleo tiene un radio muy pequeño: unas 10.000 veces menor que el radio del átomo.
- En la corteza, que corresponde a la parte exterior del átomo, se encuentra toda la carga negativa representada por los electrones. La masa de la corteza es muy pequeña en comparación con la del átomo. Según Rutherford, los electrones se mueven alrededor del núcleo a gran velocidad.

Experimentos posteriores demostraron que el núcleo es aproximadamente la cienmilésima parte del átomo. Esto es como si el núcleo fuera una cabeza de alfiler rodeada de microscópicas partículas de polvo que se extienden hasta los 100 m, en donde las partículas de polvo son los electrones. Así mismo, consideró la existencia de los protones (partículas cargadas en el núcleo atómico); encontrando que cada protón era 1.840 veces más pesado que el electrón. Sin embargo, esto no concordaba con los pesos atómicos de los elementos. Una década después su discípulo James Chadwick descubrió el neutrón, partícula sin carga eléctrica y con una masa ligeramente mayor que la del protón.

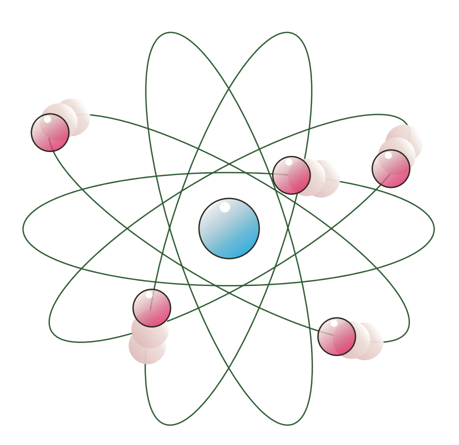


Figura 10. Modelo atómico de Rutherford. En el núcleo central se concentra toda la carga positiva, y en la corteza se encuentra toda la carga negativa.



Figura 11. Espectroscopio de emisión, con el que se identifica el espectro de cada sustancia y que puede ser continuo como el del sodio o discontinuo como el del helio.

2.2 Los espectros

La luz blanca y, por tanto, las luces que la componen, son una pequeña parte del conjunto de radiaciones electromagnéticas que existen en el universo. Además de las radiaciones visibles, las sustancias absorben o emiten radiaciones infrarroja, ultravioleta, etc.

Por tanto, el conjunto de todas las radiaciones electromagnéticas emitidas o absorbidas por una sustancia constituye el espectro electromagnético de dicha sustancia.

Las distintas radiaciones electromagnéticas se diferencian entre sí por su frecuencia y su longitud de onda. En donde el producto de ambas magnitudes es igual a la velocidad de propagación de esta radiación.

Debemos tener en cuenta que todas las radiaciones electromagnéticas se propagan en el vacío con una velocidad de 300.000 km/s, por lo cual:

$$c = \textit{longitud de onda} \cdot \textit{frecuencia}$$

donde c es la velocidad de propagación en el vacío.

2.2.1 Espectros de emisión

Los elementos al ser expuestos al calor, la luz, o al ser chocados por otros electrones emiten luz de colores característicos, es decir, con su propia distribución de frecuencias. A este conjunto de luces se le denomina **espectro visible de emisión**. Por ejemplo, si se impregna un hilo muy fino de platino con determinadas sales y se expone a la llama de un mechero, la llama adquiere unas coloraciones características del elemento metálico del cual se encuentra formado.

El primer uso que se hizo de este fenómeno con fines analíticos correspondió al realizado por el alemán Bunsen, quien en colaboración con Kirchhoff ideó un dispositivo para analizar las luces emitidas por las sales de los elementos. Este aparato se conoce como espectroscopio y consiste en un prisma en el que la luz procedente de la llama se dispersa.

En un espectroscopio cada color componente se enfoca en una posición definida y forma una imagen de la rendija sobre una pantalla, película fotográfica o algún otro detector. El espectro de luz blanca es continuo ya que los límites entre un color y otro no son nítidos. En el espectro del sodio (figura 11a) predomina una línea amarilla, y si la rendija es más angosta se ven dos líneas muy cercanas que corresponden a las frecuencias predominantes de la luz emitidas por los átomos de sodio.

Los espectros de emisión pueden ser **continuos** o **discontinuos**, dependiendo de la disposición de las luces emitidas por el emisor (figura 11b).

2.2.2 Espectros de absorción

De igual forma en que se analiza la luz o energía emitida por una sustancia, también puede analizarse la luz o energía absorbida por esa sustancia. Al iluminar una sustancia con un conjunto de radiaciones aparecerán en el espectroscopio todas las radiaciones, excepto las absorbidas por la sustancia. El espectro resultante se conoce como espectro de absorción. En él aparecen rayas oscuras en las zonas en que aparecían las rayas luminosas en el espectro de emisión (figura 12). Esto significa que las sustancias emiten las mismas radiaciones que absorben.

Figura 12. Espectroscopio de absorción, las rayas oscuras identifican las radiaciones absorbidas.



2.3 Hipótesis cuántica

En 1887 Heinrich Hertz descubrió, durante sus experimentos para generar y detectar ondas electromagnéticas, que la luz ultravioleta proveniente de la chispa inicial aumentaba la corriente entre dos electrodos metálicos. Este efecto se produce en forma instantánea y se conoce como efecto fotoeléctrico.

Sin embargo, en los últimos años del siglo XIX J.J. Thomson y Phillip Lenard demostraron, respectivamente, que las cargas emitidas en el efecto fotoeléctrico son electrones y que la energía cinética máxima adquirida por ellos no depende de la intensidad de la luz incidente sino de su frecuencia.

Para tal demostración se utilizó un haz de luz sobre una superficie fotosensible, en la cual los electrones emitidos por la superficie fueron recogidos por un colector (figura 13).

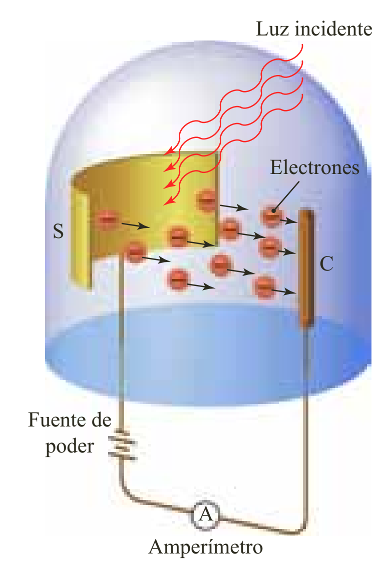


Figura 13. Experimento para demostrar que la energía cinética máxima del electrón emitido en el efecto fotoeléctrico depende de la frecuencia de la luz incidente.

2.3.1 La hipótesis de Planck

En 1900 el físico alemán Max Planck, dedicado al estudio de la radiación del cuerpo negro, enunció su hipótesis que habría de revolucionar el estudio de la física:

- La materia está conformada por partículas que oscilan emitiendo energía en forma de radiación electromagnética.
- La energía que emiten estas partículas no puede tener cualquier valor, sino tan solo algunos valores que son múltiplos de una cantidad discreta de energía, denominada **cuanto**.
- El valor de un cuanto de energía es directamente proporcional a la frecuencia de la radiación emitida, el cual se expresa como:

  $$E_{cuanto} = h \cdot f$$

  Donde h se conoce como la **constante de Planck**, y su valor es

  $$6{,}62 \times 10^{-34}\ \text{J} \cdot \text{s}.$$

- La energía solo puede absorberse o emitirse en cuantos elementales, es decir, la energía total emitida o absorbida es igual a un número entero de cuantos o paquetes elementales de energía, así que:

  $$E = n \cdot E_{cuanto} = n \cdot h \cdot f$$

  Siendo n un número entero positivo.

2.4 El efecto fotoeléctrico

2.4.1 La teoría de Einstein

En 1905 Einstein explicó el efecto fotoeléctrico en su artículo *"Electrodinámica de los cuerpos en movimiento"*, a partir de la hipótesis de Planck y del supuesto de que la luz no se comporta como una onda sino como una corriente de corpúsculos, denominados fotones.

Según Einstein, un haz de luz de cierta frecuencia se encuentra formado por un número determinado de fotones en movimiento, y la energía que transporta cada uno de ellos está dada por la expresión $E_{cuanto} = h \cdot f$.

Por tanto, un haz intenso de luz de baja frecuencia estará compuesto por millones de fotones, y cada uno de ellos transportará muy poca energía.

EJERCICIO

¿Cuál es la diferencia entre un cuanto y un fotón?

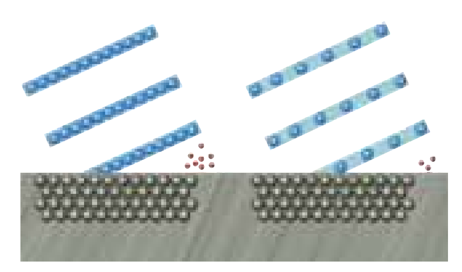


Figura 14. Forma de la interacción de la luz con la materia, propuesta por Einstein.

2.4.2 Los fotones y la intensidad de la luz

Según lo propuesto por Einstein, la luz interactúa con la materia como una corriente de fotones semejantes a las partículas (figura 14).

Cuando los rayos de luz inciden sobre el metal, los fotones chocan contra los electrones del metal. El fotón entrega toda su energía al electrón y la distribuye de dos maneras diferentes (figura 15):

- Liberando al electrón, para lo cual realiza un trabajo contra las fuerzas electromagnéticas que lo unen al metal; este trabajo se denomina trabajo de extracción (W_e).
- Proporcionando al electrón liberado una energía cinética.

De acuerdo con el principio de conservación de la energía podemos escribir que:

$$h \cdot f = W_e + \frac{1}{2} m \cdot v^2$$

Esta expresión se conoce como **ecuación fotoeléctrica**.

A partir de la expresión anterior podemos deducir la frecuencia mínima para que la luz logre la emisión de electrones llamada **frecuencia umbral** (cuyo valor depende del material) y por debajo de esta frecuencia no existe emisión de electrones. Su expresión es:

$$F_{umbral} = \frac{W}{h}$$

La energía del electrón emitido se puede calcular determinando la diferencia de potencial (V) que es necesario aplicar para detener el movimiento, valor denominado **potencial de frenado**, cuya expresión es:

$$h \cdot f - W_e = V \cdot e$$

Donde V es el potencial de frenado y e la carga del electrón.

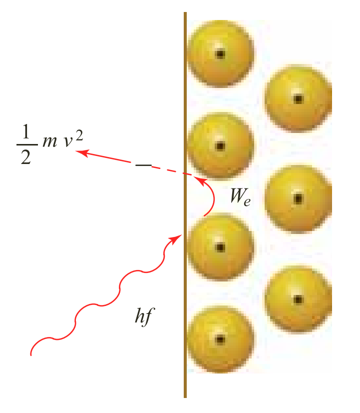


Figura 15. Distribución de la energía del fotón al chocar con los electrones del metal.

EJEMPLO

Considerar un láser cuya longitud de onda es 400 nm y tiene una potencia de 30 W. Determinar:

a. La energía que tiene cada fotón del láser.

b. El número de fotones que emite el láser cada segundo.

Solución:

a. Para hallar la energía de cada fotón, debemos calcular la frecuencia de emisión de la luz incidente:

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

$$f = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{400 \times 10^{-9} \text{ m}} \quad \textit{Al remplazar y calcular}$$

$$f = 7{,}5 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

Ahora, aplicando la ecuación que relaciona el valor de un cuanto de energía y la frecuencia, se tiene que:

$$E_{cuanto} = h \cdot f$$

$$E_{cuanto} = 6{,}63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \cdot 7{,}5 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

$$E_{cuanto} = 4{,}97 \times 10^{-19} \text{ J} \quad \textit{Al calcular}$$

Cada fotón del láser tiene $4{,}97 \times 10^{-19}$ J de energía.

b. El láser tiene una potencia de 30 W, es decir, que irradia 30 J de energía por cada segundo; entonces:

$$E = n \cdot E_{cuanto}$$

$$n = \frac{30\text{J}}{4{,}97 \times 10^{-19} \text{ J}} \quad \textit{Al despejar n y remplazar}$$

$$n = 6{,}03 \times 10^{19} \text{ fotones} \quad \textit{Al remplazar}$$

En un segundo, el láser emite $6{,}03 \times 10^{19}$ fotones.

2.5 El modelo atómico de Bohr

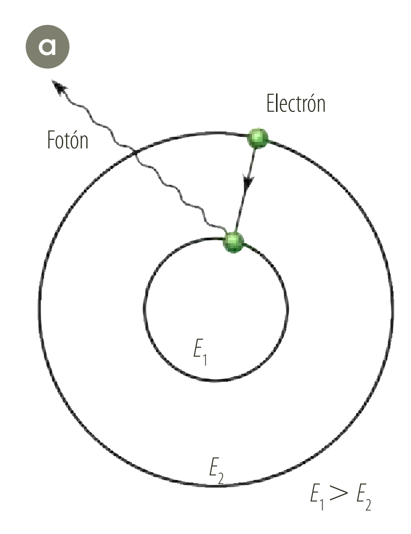
El físico danés Niels Bohr (1885-1962) se interesó por ensamblar diferentes ideas para construir un modelo imaginario de átomo que se acoplara aproximadamente a los resultados de observaciones hechas de átomos reales.

Durante este ensamble el modelo tuvo muchas etapas, las cuales concluyeron en un modelo planetario (mecánica clásica), con principios cuánticos sobre la emisión de energía y una serie de reglas sobre el comportamiento del electrón:

- El electrón al girar describe órbitas circulares de las cuales no todas son estables. Es decir, el electrón no puede encontrarse a cualquier distancia del núcleo, solo a determinadas distancias fijas.
- El electrón tiene una energía específica en cada órbita y está asociada con la longitud del radio de la órbita. En donde esta energía es directamente proporcional a la longitud del radio de la órbita.
- Si el electrón se encuentra en una órbita estable, el átomo no emite energía. Si el electrón absorbe o cede energía, salta de una órbita estable a otra.

Si un electrón se encuentra en la órbita más pequeña posible (estado fundamental) y recibe energía del exterior, puede saltar a otra órbita más lejana del núcleo (estado excitado); allí permanece aproximadamente 10^{-9} s y decae al estado fundamental. Puede caer de un salto al estado fundamental o en varios saltos, ocupando otras órbitas estables intermedias. Cada vez que el electrón pasa de una órbita de mayor radio (mayor energía) a otra de menor radio (menor energía), el electrón emite un fotón (figura 16a). Cuando el electrón absorbe el fotón, este pasa a un estado excitado de mayor energía (figura 16b).

Este modelo de Bohr ha permitido explicar satisfactoriamente el espectro de la luz del átomo de hidrógeno, los rayos X en los elementos más pesados, las propiedades químicas de los elementos y el descubrimiento del hafnio. Sin embargo, Bohr siempre enfatizó en no tomar exactamente las órbitas, por las implicaciones conceptuales que esto trae.



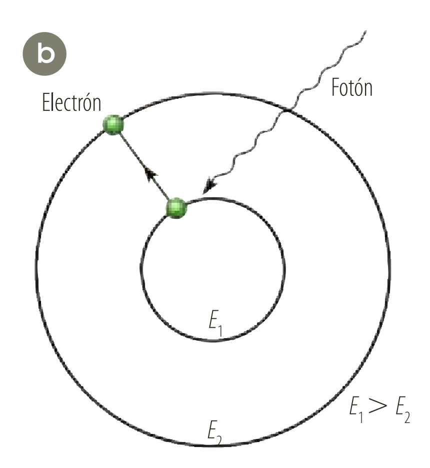


Figura 16. El electrón emite un fotón cuando pasa de una órbita de mayor energía a una de menor, y absorbe un fotón cuando pasa de una de menor energía a una de mayor.

2.5.1 Interpretación de los espectros atómicos

El éxito del modelo de Bohr radicó en la concordancia con el espectro visible del átomo de hidrógeno. Este espectro del hidrógeno es discontinuo y formado por cuatro rayas brillantes, cuyas frecuencias se ilustran en la figura 17.

Cada elemento tiene un mismo espectro y es diferente de otro elemento, es como la huella digital del elemento. El modelo atómico de Bohr permite explicar el fenómeno de la siguiente manera:

- Cada una de las líneas que se observan en un espectro corresponde a la radiación emitida o absorbida cuando el electrón salta de una órbita estable a otra.
- El valor de la energía de dicha radiación es directamente proporcional a su frecuencia; así, cuando un electrón salta de una órbita de mayor energía, E_2, a otra de menor energía, E_1, se emite una radiación de frecuencia f, cuyo valor de energía es:

$$E_2 - E_1 = h \cdot f$$

En donde h es la constante de Planck, debido a que todos los átomos de un mismo elemento son iguales.

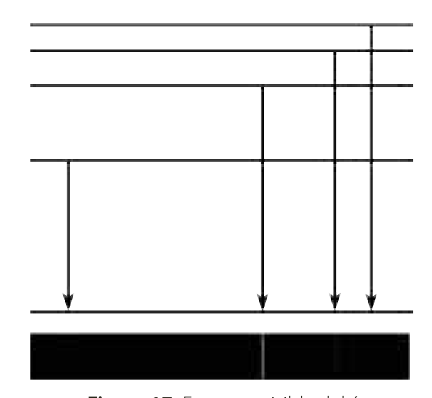


Figura 17. Espectro visible del átomo de hidrógeno.

2.6 El modelo atómico actual

2.6.1 Dualidad partícula-onda

Así como Einstein propuso una dualidad en el comportamiento de la luz, de tal modo que al propagarse actúa como onda y al interactuar con la materia lo hace como partícula, el francés Louis de Broglie (1892-1987) pensó que tal vez los electrones y otras partículas tuvieran también propiedades ondulatorias. De Broglie presentó estas ideas en su tesis de doctorado, sustentada en 1924 y publicada en 1925. Él sugirió que toda partícula en movimiento lleva asociada una onda, de modo que la longitud de onda (λ) de la onda asociada está relacionada con la velocidad (v) de la partícula, es decir:

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$$

De acuerdo con la ecuación anterior, cuando la masa del cuerpo es elevada, la cantidad de movimiento es mayor y por tanto, la longitud de onda es tan pequeña que no se deja detectar. Para partículas de masas pequeñas como la del electrón la cantidad de movimiento es muy pequeña, haciendo que la longitud de onda alcance a la de una radiación de alta frecuencia y sea detectable.

La difracción de electrones ya había sido detectada en 1914 por Davisson y Kunsman al utilizar haces de electrones en el estudio de cristales. Ellos creían que esta dispersión de electrones se debía a la estructura del átomo y no a la naturaleza misma del electrón.

Posteriormente, Erwin Schrödinger expresó una nueva teoría de la estructura atómica tomando y ampliando la idea de De Broglie. De esta manera, Davisson y Germen observaron que las láminas metálicas difractan un haz de electrones exactamente del mismo modo en que difractan un haz de rayos X. Es más, la longitud de onda que se deduce para este haz es exactamente la misma que se obtendría al utilizar la hipótesis de De Broglie, lo cual confirma su validez.

EJEMPLO

Calcular la longitud de onda de De Broglie para:

a. Una pelota de tenis, con una masa de 0,1 kg, que en un saque alcanza una rapidez de 50 m/s.

b. Un electrón que se mueve a una velocidad de $7{,}3 \times 10^6$ m/s.

Solución:

a. De acuerdo con la relación establecida por De Broglie:

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$$

$$\lambda = \frac{6{,}63 \times 10^{-34}\ \text{J} \cdot s}{0{,}1\ \text{kg} \cdot 50\ \text{m/s}} = 1{,}33 \times 10^{-34}\ \text{m}$$

La longitud de onda de la pelota de tenis es igual a $1{,}33 \times 10^{-34}$ m. Esta longitud es demasiado pequeña para ser medida.

b. Para calcular la longitud de onda de un electrón, debemos considerar la masa del electrón:

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$$

$$\lambda = \frac{(6{,}63 \times 10^{-34}\ \text{J} \cdot s)}{(9{,}11 \times 10^{-32}\ \text{kg})(7{,}3 \times 10^{6}\ \text{m/s})}$$

$\lambda = 9{,}9 \times 10^{-11}$ m *Al calcular*

La longitud de onda del electrón es $9{,}9 \times 10^{-11}$ m.



2.6.2 El principio de incertidumbre

Después de establecida la dualidad onda-partícula de los cuantos, surgió la discusión sobre si el acto de medir afecta o no, en cierto modo la cantidad que se está midiendo.

Experimentos realizados han demostrado que toda medida que en cualquier forma explore un sistema subatómico perturba al sistema en al menos un cuanto de acción, h. Así que toda medida que implique la relación entre el medidor y lo que se mide está sujeta a una inexactitud mínima. Este hecho se conoce como **principio** de **incertidumbre** y fue enunciado por el físico alemán Werner Heisenberg.

Por ejemplo, si para observar el movimiento rápido de una pelota, se instalan dos foto celdas en dos sitios por donde cruza la pelota, de tal manera que una activa el cronómetro y la otra lo detiene, puede existir inexactitud en la distancia entre las dos celdas o los mecanismos para cronometrar.

La inexactitud o incertidumbre en el campo subatómico, como en el caso del electrón, es diferente. Para observar mejor al electrón se requieren ondas muy cortas que implican cuantos de energías muy grandes y que afectan en gran medida el estado de movimiento del electrón. Si la observación se hace con ondas más largas que corresponden a energías más bajas, estas no afectan mucho el estado del movimiento del electrón, pero es menos exacta la determinación de la posición del electrón.

Definición

No se puede conocer simultáneamente y con una precisión absoluta la posición y la cantidad de movimiento (m · v) de un electrón.

Es importante resaltar que el principio de incertidumbre se refiere a un principio básico de la naturaleza, debido a la imposibilidad de obtener información de un sistema y no a la falta de precisión de los instrumentos de medición u otras dificultades de tipo experimental.

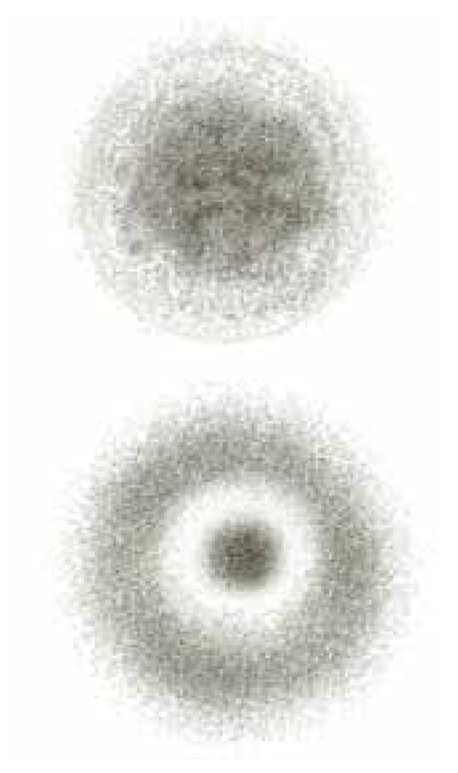


Figura 18. Las zonas oscuras son las de mayor probabilidad de encontrar un electrón en algunos estados del átomo de hidrógeno, dentro de la distribución de la probabilidad.

2.6.3 El modelo atómico actual

Después del breve relato histórico expuesto hasta el momento, el modelo atómico actual se basa en los siguientes supuestos:

- Debido a que todo electrón en movimiento lleva asociada una onda, el comportamiento del electrón se describe mediante una expresión llamada ecuación de onda, conocida como **ecuación de Schrödinger**.
- Puesto que no es posible tener toda la información sobre el electrón durante todo el tiempo, se introduce el concepto de **probabilidad** para describir las magnitudes asociadas con el electrón: posición, velocidad, energía.
- La energía de los electrones está cuantizada, es decir, solo puede tener ciertos valores.

La ecuación de onda identifica la región del espacio en donde es más probable encontrar cada electrón; esta región se denomina orbital y depende, en forma y tamaño, de la energía del electrón que lo ocupa. La figura 18 muestra la distribución de probabilidad de la posición de un electrón en algunos estados del átomo de hidrógeno. Las zonas más oscuras corresponden a las zonas de mayor probabilidad donde se encuentra el electrón.

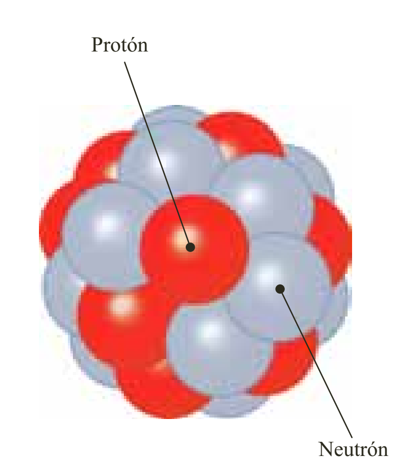


Figura 19. Vista del núcleo en la que se muestran los protones y neutrones.

3. Estructura nuclear

3.1 El núcleo atómico

Una de las conclusiones más importantes obtenidas por Rutherford en su experimento del bombardeo de la lámina de oro con partículas alfa era que el átomo estaba formado por un núcleo central, de carga positiva y con una masa muy alta en comparación con los electrones que giraban en torno a él. Sin embargo, estos estudios no informaban nada respecto a la estructura del núcleo atómico.

Solo en 1932 se logró determinar que el núcleo estaba formado por dos tipos de partículas: los **protones** y los **neutrones** (figura 19).

- Los **protones** tienen una carga positiva de $1{,}602 \times 10^{-19}$ C y una masa de $1{,}673 \times 10^{-27}$ kg, aunque se usa otra unidad de masa llamada unidad de masa atómica (uma), simbolizada por u y donde
  1 u = $1{,}66606 \times 10^{-27}$ kg, por lo cual la masa del protón es 1,0073 u.
- Los **neutrones** no tienen carga y su masa es un poco mayor que la del protón, es decir, $1{,}675 \times 10^{-27}$ kg medida en el SI y en términos de uma es 1,0087 u.

Recordando la equivalencia entre masa y energía propuesta por Einstein, es posible establecer la cantidad de energía correspondiente a una unidad de masa atómica de la siguiente manera:

$$E = m \cdot c^2$$

$$E = (1{,}66606 \times 10^{-27}\ \text{kg})(3 \times 10^8\ \text{m/s})^2$$

$$E = 1{,}49 \times 10^{-10}\ \text{J} = 931{,}49\ \text{MeV}$$

Es decir, la energía equivale a 1 u = 931,49 MeV (megaelectronvoltios).

Al número total de nucleones en el núcleo de un átomo se le da el nombre de número másico atómico o número de masa y se simboliza mediante la letra A. El número A de nucleones es aproximadamente igual a la masa del núcleo del elemento en cuestión. Por ejemplo, el núcleo del oxígeno tiene 8 neutrones y 8 protones y una masa de 15,995 u, siendo entonces su número de masa 16.

En nuestra escala cotidiana de tamaños cuesta imaginar las dimensiones de un átomo, pero, para que te formes una idea de lo pequeño que es, puede ser útil saber que el diámetro del punto final de esta frase equivale a una fila de mil millones de átomos.

Los numerosos experimentos realizados por Rutherford permitieron determinar que el núcleo atómico es aproximadamente esférico y que su radio está entre los valores de 10^{-15} m y 10^{-12} m. El menor radio corresponde al átomo más simple, que es el de hidrógeno, mientras que el mayor corresponde al uranio.

Dado que el valor del radio es tan pequeño, se definió el fermi (1 fm = 10^{-15} m) en reconocimiento al físico italiano Enrico Fermi, quien hizo importantes aportes al estudio de los procesos nucleares.

Cuando el núcleo es golpeado con partículas energéticas salen de él otro tipo de partículas, las cuales no están atrapadas dentro del núcleo ni se liberan al ser golpeadas, sino que se crean por las colisiones de los nucleones.

Los nucleones no son partículas fundamentales, como sí se considera a los electrones. Los nucleones están formados por otras partículas subnucleares llamadas **quarks**, propuestas por primera vez por Murria Gell-Mann. Hay seis tipos de quarks: *up* (hacia arriba), *down* (hacia abajo), *stranger* (extraño), *charm* (encanto), *top* (el de arriba) y *bottom* (el de abajo). Así, un protón está formado por tres quarks, dos up y uno down. Un neutrón está formado por un *up* y dos *down*. Los quarks se consideran partículas fundamentales.

3.2 Modelos nucleares

¿Alguna vez te has preguntado por qué los protones provistos de carga positiva no se repelen entre sí, estando tan cerca y siendo la fuerza gravitacional entre ellos muy débil en comparación con la eléctrica? La respuesta a esta pregunta es que entre las partículas del núcleo existe una fuerza llamada fuerza nuclear, cuya parte principal se mantiene unida al núcleo y se denomina **interacción fuerte**.

Esta fuerza nuclear tiene acción sobre los hadrones (a los cuales pertenecen el protón y el neutrón) y, a distancias no superiores a las dimensiones nucleares, (del orden de 10^{-15} cm), es de tipo atractivo, de tal manera que vence la repulsión electrostática existente entre los protones.

La fuerza nuclear se hace cero a mayores separaciones; por tanto, para los protones en los núcleos pequeños la fuerza nuclear vence fácilmente a la fuerza eléctrica, pero para los protones alejados en un núcleo grande esta fuerza nuclear puede ser pequeña ocasionando desestabilidad nuclear. Así, un núcleo mayor no es tan estable como un núcleo menor.

Para explicar los fenómenos nucleares se usan modelos nucleares y entre ellos están: el de partícula uniforme, el de partícula independiente, el de partícula alfa y el de la gota líquida.

- **Partícula uniforme.** Este modelo, propuesto por el físico húngaro Eugene Wigner (1902-1995), supone que por efecto de las enormes interacciones entre los nucleones producidas por las fuerzas nucleares, no puede seguirse en detalle el movimiento de cada nucleón sino que debe tratarse estadísticamente. Este modelo es útil en la explicación de las energías que ligan al núcleo, pero muchos resultados experimentales contradicen las predicciones que genera el modelo.
- **Partícula independiente.** También se conoce como modelo nuclear de capas. La hipótesis de este modelo es que cada nucleón se mueve independientemente de los restantes y se halla sometido a la acción de un campo nuclear medio, originado por todos los otros nucleones.
- **Partícula alfa.** Se basa en el supuesto de que las partículas alfa forman subgrupos dentro del núcleo. Dichas partículas alfa no necesitan tener existencia permanente sino que pueden realizar intercambios entre sí. Este modelo es útil para explicar núcleos de números de masa $A = 4n + 1$, donde n es un número entero, pero no para mayores que estos.
- **Gota líquida.** Propuesto por Bohr en 1937, este modelo supone que el núcleo se comporta de manera análoga a una gota líquida, con una tensión superficial definida que retiene a los nucleones de modo semejante a como una gota retiene sus moléculas de líquido. La desintegración de núcleos por emisión de partículas es análoga a la evaporación de moléculas desde la superficie de un líquido.

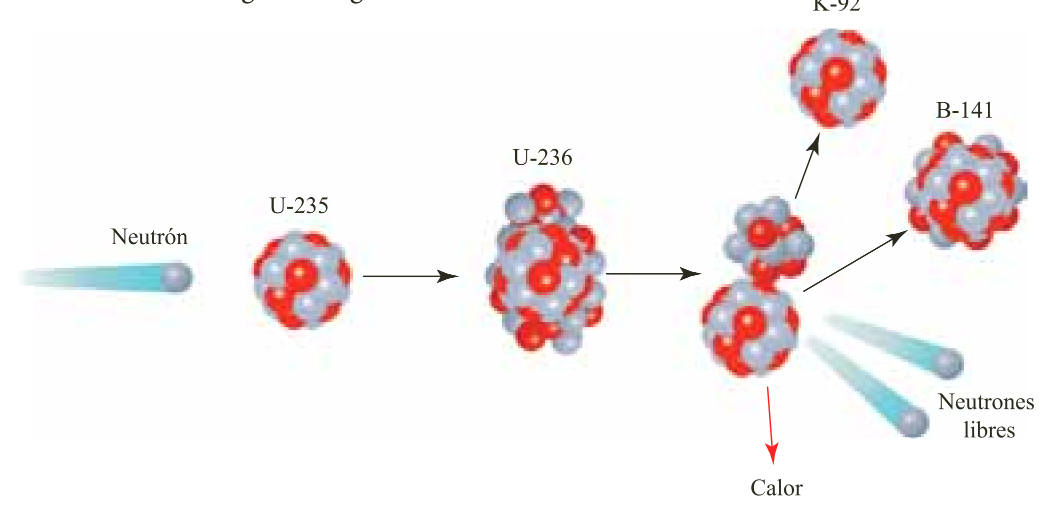
3.3 Fisión nuclear

La fuerza nuclear es la responsable de que los nucleones permanezcan en el centro del átomo (núcleo). A distancias medias (hasta de 10^{-15} m) la fuerza es de atracción, si hay una distancia muy grande entre ellos la fuerza nuclear es cero y si la distancia es muy pequeña es una fuerza de repulsión.

En el uranio la fuerza nuclear no es tan intensa, por lo cual las fuerzas eléctricas pueden ocasionar un alargamiento de su núcleo, de tal forma que estas fuerzas de repulsión logran vencer las fuerzas nucleares y así dividir el núcleo en dos. Si esto ocurre, se dice que se presentó una **fisión nuclear**.

Es posible definir la fisión nuclear como el proceso mediante el cual un núcleo pesado, y, por tanto, inestable energéticamente, se divide en dos fragmentos de menor masa, liberándose gran cantidad de energía.

La explicación teórica de la fisión fue dada por Meitner y Frisch, quienes sostienen que cuando un núcleo de uranio captura un neutrón, lo retiene durante un intervalo de tiempo muy breve y luego explota en dos núcleos aproximadamente del mismo tamaño, tal como se representa en la siguiente figura.



Cuando el núcleo de uranio absorbe el neutrón, este le proporciona la energía suficiente para que el núcleo rebase el punto crítico de alargamiento, cuya división forma kriptón-92, bario-141 y tres neutrones libres.

Estos tres neutrones libres chocan con otros tres átomos de uranio, liberando de esta manera un total de nueve neutrones, que a su vez chocan nuevamente formando una serie de neutrones, que continúan el proceso.

Esta secuencia recibe el nombre de **reacción en cadena**. Cada paso de la reacción requiere más o menos 0,01 s, así que después de 1 s el número total de neutrones es de 3^{100}. Como 235 g de U-235 contienen 6×10^{23} átomos, esta reacción en cadena se presenta con cierta violencia explosiva.

Al sumar las masas de los fragmentos de la fisión se observa que es una cantidad menor que la que originalmente tenía el uranio.

Esto indica que se pierde masa, la cual se transforma en energía, tal como lo indica la ecuación de Einstein: $E = m \cdot c^2$. Esta energía es del orden de 32 pJ (pico julios) o 32 millones de eV (electronvoltios).

Esta energía se distribuye entre la energía cinética de los fragmentos de la fisión, la energía cinética de los neutrones expulsados y una pequeña parte en la radiación de una partícula gamma.

Para que se produzca una reacción en cadena es necesario que el neutrón absorbido recorra dentro del uranio una distancia considerable, de tal manera que alcance a chocar con otros átomos de uranio.

Si la muestra de uranio es muy pequeña es posible que el neutrón se escape del uranio y no haya más fisiones. Presentándose entonces una relación entre la masa y la geometría del uranio.

Para realizar la explosión atómica de Hiroshima (Japón) en 1945 (figura 20), se usó U-235 cuyo volumen era comparable a una pelota de sóftbol. La gran y difícil tarea de los científicos que formaron parte del proyecto Manhattan (que creó la bomba atómica) fue separar esta cantidad de U-235 del uranio natural metálico puro.

Este isótopo es sólo 0,7% del uranio natural, cuyo componente predominante es el isótopo U-238, el cual absorbe electrones pero amortigua rápidamente la reacción en cadena.



Figura 20. Explosión bomba atómica de Hiroshima en la que se utilizó U-235.

3.4 Reactores nucleares

Un reactor nuclear es un dispositivo en el que se generan reacciones nucleares a gran escala. Pueden servir para suministrar energía útil, producir nuevos isótopos o para investigación. El primer reactor nuclear fue construido en EE.UU. bajo la dirección del físico italiano Enrico Fermi en 1939, un año después del descubrimiento de la fisión. En 1942 se logró obtener la primera liberación autosostenida y controlada de energía nuclear cuya aceleración de los neutrones fue detenida mediante el uso de grafito.

En forma general, un reactor nuclear es un tanque de acero (figura 21) dentro del cual se encuentra:

- Un núcleo, que contiene el combustible; comúnmente es uranio-238 con 3% de U-235.
- El moderador es la barrera para evitar la fuga de material radiactivo.
- Varillas de control para absorber los neutrones excedentes.
- Un reflector para rebotar los neutrones que se dispersan nuevamente hacia el núcleo.
- Refrigerante para llevar la energía desde el núcleo al moderador.
- Una capa de blindaje para proteger a los operarios frente a la intensa radiación generada.

Dentro del núcleo los neutrones inciden sobre el combustible nuclear donde se encuentran los núcleos de uranio-235. El neutrón y el U-235 forman U-236 que rápidamente se fisiona, dando lugar a nuevos neutrones. Mientras que los productos de la fisión, para este caso kriptón-91 y bario-142, se frenan en el combustible generando calor.

La población de neutrones y, por tanto, la energía generada, se controla gracias al movimiento de las barras de control construidas de cadmio, material que absorbe los neutrones.

Hay reactores distribuidos por todo el mundo. En Francia, más del 80% de la energía que consumen sus habitantes proviene de la energía nuclear.

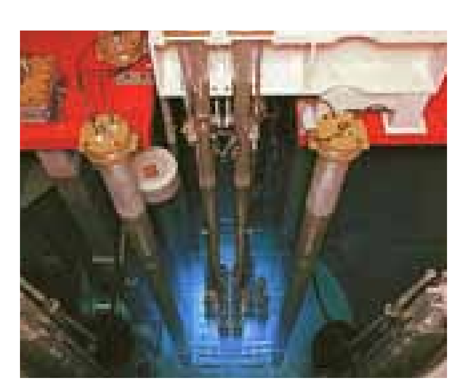


Figura 21. Vista interna de un reactor nuclear.



Figura 22. Reactor nuclear de Colombia ubicado en el IAN-RI en Bogotá.

En Colombia existe desde 1965 un reactor nuclear que está ubicado en Bogotá, es el IAN-R1 (figura 22). Es un reactor de baja potencia, por lo que no produce energía en volumen; su núcleo está compuesto por 14 barras de uranio, genera 30 kilovatios térmicos, es decir, entre 10 mil y 100 mil veces menos que los que alimentan las redes eléctricas.

Se usa para la producción de neutrones, análisis químicos, para calcular la edad de los suelos y para fabricar algunos isótopos útiles en industrias, como la farmacéutica y la ingeniería. Por ejemplo, el yodo-125 ayuda a identificar problemas en la tiroides y el oro-198 se usa para detectar fugas en las represas.

3.5 Fusión nuclear

Otra forma de producir energía nuclear es por medio de la combinación de dos núcleos ligeros en un núcleo más pesado, proceso que se conoce como fusión nuclear.

Para producir fisión nuclear se requieren núcleos pesados; contrario a este proceso, para generar fusión nuclear se requieren núcleos livianos.

Para realizar la fusión de dos núcleos livianos es necesario imprimirles grandes velocidades, de tal manera que cuando choquen logren superar la repulsión eléctrica mutua. Estas velocidades se lograrían a altas temperaturas como las que se presentan en el Sol o en las estrellas (figura 23). Fusión denominada termofusión.

En las reacciones de fisión la cantidad de materia que se convierte en energía es alrededor de 0,1%, mientras que en la fusión es de 0,7%. Esto indica que hay más generación de energía en la fusión, que se manifiesta en su mayoría de veces, en la energía cinética de los neutrones. Por tanto, al frenar estos neutrones se obtendría gran cantidad de calor que se puede convertir en electricidad.

Los problemas de posible contaminación que presentan los reactores de fisión, además de las dificultades para deshacerse de los residuos altamente reactivos que producen, han obligado a pensar en una alternativa para el futuro que sea al mismo tiempo poco contaminante y que no presente dificultades en la obtención de combustible. Esta alternativa está fundamentalmente dirigida hacia la obtención de energía de fusión a partir del hidrógeno, ya que este elemento es muy abundante y además el proceso es mucho menos peligroso que la fisión de núcleos pesados.

El primer reactor de fusión nuclear, el Tokamak, se puso en marcha en China. Pero debido a que ningún material terrestre resiste la elevada temperatura a la cual debe ser sometido, fue necesario desarrollar una "caja inmaterial", la cual es un campo magnético capaz de contener gases calientes y con carga eléctrica (plasma). En este reactor, por cada megavatio utilizado en provocar y mantener la fusión se obtienen solo 0,25 megavatios.

La meta es que se incremente en una proporción de 1:50, proporción que es muy superior a lo producido por los reactores de fisión. Además, los reactores de fusión no producen materia radiactiva; el combustible que usan es muy abundante, pues el deuterio y el tritio son isótopos del hidrógeno y, como tales, se encuentran en el agua.

La cantidad de deuterio que se encuentra en un litro de agua es capaz de liberar una energía equivalente a la de 88 galones de gasolina.

Figura 23. La termofusión nuclear requiere de altas temperaturas como las que se presentan en el Sol.

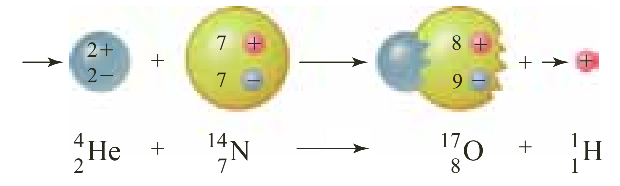
3.6 La radiación: uso, detección y daños

Ya se mencionó que para ligar el núcleo existen fuerzas nucleares que actúan sobre los hadrones y que, dependiendo de las distancias entre ellos, suelen ser de atracción fuerte, nula o de repulsión. La fuerza nuclear es mayor entre un neutrón y un protón que entre neutrones y protones entre sí. Así que los primeros 20 elementos de la tabla periódica tienen, más o menos, el mismo número de neutrones que protones y son núcleos relativamente estables.

Para los elementos de núcleos más grandes se observa que el número de neutrones es mayor que el de protones, esta desigualdad aumenta en la medida en que el elemento es más pesado. Por ejemplo, el isótopo de uranio 238 tiene 92 protones y 146 neutrones; si este elemento tuviera menor número de neutrones que de protones explotaría debido a que las fuerzas eléctricas no alcanzarían a ser contrarrestadas por las fuerzas nucleares. Se requiere que haya más neutrones, de tal modo que estén más cerca de los protones y la fuerza nuclear sea efectiva.

Estos elementos pesados (núcleos de más de 82 protones) son inestables, ya que se producen choques dentro de sus núcleos, y si además chocan contra partículas de alta energía se producen otras partículas que se disparan del átomo, expulsión denominada radiación.

Cuando el átomo de un elemento produce radiación, este cambia y se produce otro elemento. Proceso que se conoce con el nombre de transmutación de los elementos, y puede ser natural o artificial. Por ejemplo, en la siguiente figura se ilustra el bombardeo del núcleo de nitrógeno con partículas alfa, que son átomos de helio.



$$^{4}_{2}He + ^{14}_{7}N \longrightarrow ^{17}_{8}O + ^{1}_{1}H$$

Se puede observar que el nitrógeno se transmuta en oxígeno y produce un átomo de helio.

Cada elemento lleva consigo una descripción de su masa y su carga, así en el nitrógeno la masa es de 14 u y 7 e de carga, y se expresa como:

$$^{M}_{Z}X \rightarrow ^{14}_{7}N$$

3.6.1 Usos de la radiación

Vivimos inmersos en un mundo de radiaciones naturales ionizantes y penetrantes procedentes de las rocas, suelos, aguas, atmósfera y espacio exterior como resultado de la desintegración de núcleos atómicos inestables.

Además, el hombre ha logrado sintetizar a voluntad, especies nucleares inestables bombardeando núcleos estables con partículas de alta energía. Estos nuevos núclidos, a su vez, se convierten en fuente de radiación de una intensidad y variedad sin precedentes en la naturaleza. El uso de todas estas radiaciones depende de dos aspectos de penetración de las radiaciones de alta energía en la materia: los efectos de la interacción en las propias radiaciones y los efectos sobre la materia.



Figura 24. Aplicación de la radiación en el campo de la medicina, para lograr imágenes de los huesos.

La radiación se utiliza en el campo de la medicina y en investigación. Por ejemplo, los fotones de rayos X tienen alta energía y pueden atravesar muchas capas del átomo antes de ser absorbidos o dispersados. Los rayos X pasan a través de los tejidos blandos del cuerpo humano o de un animal y producen imágenes de los huesos en el interior del organismo (figura 24).

Así mismo, la radiografía industrial se basa en el gran poder de penetración de los rayos gamma. Estos rayos tienen mayor poder de penetración que los rayos X, por eso los aventajan en el examen no destructivo de la estructura interna de piezas, mecanismos y soldaduras. Con este tipo de radiografía se pueden descubrir desajustes, imperfecciones o huecos en las piezas de los mecanismos. Por esta razón, cada día son más usados en el control de calidad de las realizaciones industriales.

Una de las aplicaciones más interesantes de la radiactividad es la utilización de los radioisótopos como trazadores. Esta técnica consiste básicamente en seguir la trayectoria que describe un isótopo radiactivo en el interior de un sistema; es muy empleada en áreas tan diversas como la medicina, la agricultura y la industria.

En la industria, por ejemplo, se emplean radioisótopos para determinar la velocidad de un fluido, las eventuales fugas o el desgaste de tuberías.

En medicina la técnica de radioisótopos se emplea en el diagnóstico de enfermedades cardiacas, pulmonares, renales y cerebrales, entre otras; para ello se inyectan pequeñas dosis de tecnecio-99 metaestable; en las personas que tienen problemas de la glándula tiroides se suele administrar yodo-131 para detectar la causa de su disfunción, y se emplea el cromo-51 para la localización de hemorragias internas.

En la agronomía es posible efectuar estudios de transporte utilizando radioisótopos. Por ejemplo, mediante la aplicación de carbono-14 radiactivo, es posible saber a dónde se dirigen los carbohidratos sintetizados por el vegetal. Del mismo modo, mediante el uso de fósforo-32 y nitrógeno-15 es posible determinar la cantidad de abono capaz de absorber una planta.

3.6.2 Métodos de detección de la radiación

Debido a que las radiaciones de alta energía pueden ocasionar la muerte de células, se usa la radiación para tratamientos de cáncer. Esta radiación dirigida con sumo cuidado destruye en forma selectiva las células cancerosas.

Para detectar las radiaciones se usan diferentes aparatos, entre los cuales están el contador Geiger, la cámara de niebla, el contador de chispa y las emulsiones fotográficas.

- **El contador Geiger** es un dispositivo que se usa para detectar radiaciones ionizantes y dar un recuento de las partículas y fotones. Consiste en un tubo lleno de gas con un cátodo cilíndrico de metal y un ánodo axial de alambre. Se aplica entre ellos una diferencia de potencial (400 V - 2.000 V). Cuando una partícula alfa, beta o un fotón de radiación gamma choca con las moléculas del gas produce iones, que se mueven hacia los electrodos. Los electrones que se aceleran hacia el ánodo ionizan otras moléculas del gas, ocasionando una avalancha de electrones que producen un impulso que se puede medir en el ánodo. El impulso de corriente se puede utilizar para operar un equipo de recuento y así identificar miles de partículas por segundo.

- **La cámara de niebla** se emplea para hacer visibles las trayectorias de una radiación ionizante, especialmente de las partículas alfa y beta. Consiste en una cámara cilíndrica de vidrio con una tapa en su extremo superior, y el otro extremo provisto de un pistón. Dentro de la cámara hay una muestra de radiación y aire húmedo. Cuando la radiación pasa por la cámara se producen iones a lo largo de la trayectoria, que es enfriada mediante una súbita expansión adiabática (pistón), lo cual hace que el aire quede sobresaturado con vapor de agua. La mayoría de las gotas se condensan sobre estos iones y forman trazas de vapor que indican las trayectorias de la radiación.
- **El contador de chispa** se emplea para contar partículas alfa. Consiste en un alambre o malla ubicado a corta distancia encima de una placa conectada a tierra. El alambre tiene un elevado potencial menor que el necesario para causar una chispa. Al pasar una partícula alfa cerca del alambre, el campo eléctrico aumenta y salta una chispa entre los dos electrodos. El pulso de salida entra a un sistema electrónico donde es contado.
- **Las emulsiones fotográficas**, es el método mediante el cual Becquerel descubrió la radiactividad. Cuando una partícula ionizante penetra en la emulsión deja una traza formada por granos de bromuro de plata sensibilizados. En la actualidad se fabrican emulsiones especialmente destinadas para este fin, denominadas emulsiones nucleares.

3.6.3 La radiactividad y los daños en los seres vivos

La radiactividad es más antigua que el ser humano mismo. Los habitantes terrestres estamos expuestos diariamente a radiaciones naturales producidas por el suelo donde estamos, los ladrillos de las edificaciones donde vivimos, en los vuelos aéreos, e incluso nosotros somos fuente de radiaciones debido a los alimentos que consumimos, que liberan potasio (K).

En nuestro organismo existe alrededor de 200 g de K, de los cuales 200 mg son de K 40, un isótopo radiactivo. Durante algo más de un segundo se desintegran radiactiva y espontáneamente unos 5.000 átomos de K-40. Nuestro organismo también contiene carbono 14 y debido a sus radiaciones produce 3.000 partículas beta cada segundo.

Las personas que viven en ciudades altas como Bogotá están más expuestas a la radiación cósmica, alrededor del triple que las que están al nivel del mar.

Las células de los seres vivos están formadas por estructuras ancladas en el seno de una sustancia líquida rica en iones. Cuando una radiación está en ella, provoca caos a nivel atómico que genera una cadena de destrucciones o transformaciones que resultan dañinas para el proceso vital. Las células pueden recuperarse del daño, o reponen las que se mueren, exceptuando las células nerviosas, que son irremplazables. Las transformaciones pueden a largo plazo desencadenar un cáncer. Las radiaciones que inciden en un feto o en un niño son más dañinas que en el adulto, debido a la rapidez de cambios celulares que suceden en sus organismos.

Para cuantificar el efecto biológico de una dosis absorbida de radiación se define una unidad llamada sievert (Sv). Normalmente cada persona está expuesta a 20 Sv por año. En cualquier caso, la radiación debe mantenerse en un nivel mínimo posible. Se ha establecido que el tope máximo de dosis anual es de 500 Sv, exceptuando los ojos y los órganos reproductores.





Interpreta

1 **Si al mismo tiempo que disparamos un haz de láser navegamos a la par del haz en una nave a velocidad $c/2$:**

a. ¿Qué velocidad le mediríamos a la luz láser desde la nave?

b. ¿Qué dice el segundo postulado de la relatividad al respecto?

2 **¿Qué significa en el lenguaje cotidiano que dos eventos son simultáneos? ¿Se puede afirmar, en principio, que dos eventos son simultáneos desde cualquier marco de referencia? ¿Cómo se haría para saber si dos eventos son simultáneos?**

3 **Una radiación que proviene de una fuente muy intensa de luz roja transporta mayor energía que una radiación que proviene de una fuente muy débil de luz azul. Pero la luz roja es incapaz de extraer electrones de una superficie fotosensible a diferencia de la luz azul. ¿Cómo se explica este fenómeno?**

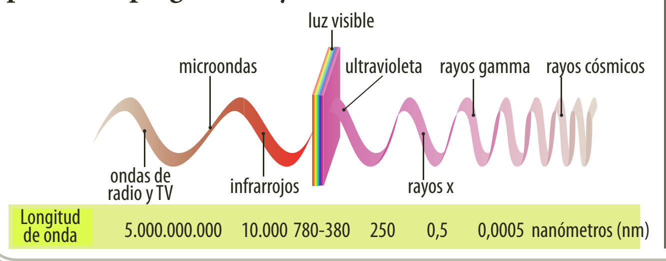
4 **En la figura se muestra el dispositivo para obtener el espectro de absorción de una sustancia. En la pantalla se observan dos líneas oscuras. A partir del modelo de Bohr, explica el resultado de esta observación.**



5 **Una fuente de luz de 250 W emite el 0,2% de la potencia que se le suministra en forma de luz con una frecuencia que da el color azul. ¿Cuál es el número de fotones que incide en una superficie de 2 cm^2 colocada a 50 cm de la fuente?**

Argumenta

Observa el espectro electromagnético. Luego, responde las preguntas 6 y 7.



6 **La mayoría de las personas suelen utilizar bloqueador para protegerse la piel contra las quemaduras del Sol. ¿Por qué la radiación infrarroja no produce daños a la piel mientras la ultravioleta sí?**

7 **Según el espectro electromagnético, ¿qué rayos poseen mayor energía y cuáles tienen menor energía?**

8 **Un microscopio electrónico es un instrumento que utiliza electrones en lugar de fotones o luz visible para poder formar imágenes de objetos diminutos. Su capacidad de aumento es mucho mayor que los microscopios ópticos. Esto se debe a que la longitud de onda de los electrones es mucho menor que la de los fotones. Su funcionamiento se debe a un cañón de electrones que son acelerados por un voltaje alto y focalizados por medio de lentes magnéticas; de esta manera, los electrones atraviesan la muestra y se amplifican gracias a las lentes que forman la imagen sobre la placa fotográfica o sobre una pantalla sensible al impacto de los electrones. Responde:**

a. ¿Por qué un microscopio electrónico es más potente que uno óptico?

b. ¿En qué se basa el funcionamiento del microscopio electrónico?

c. ¿Cuáles crees que sean las limitaciones que presenta un microscopio electrónico?

Propone

9 **Cada átomo tiene una energía enorme capaz de producir una bomba atómica. Esta energía está gobernada por la fórmula de Einstein $E = mc^2$.**

a. ¿Crees que Einstein y sus estudios sobre la relación masa-energía estaban dirigidos a ocasionar las repercusiones que tuvo la explosión de la bomba atómica?

b. ¿Piensas que algunas veces los conocimientos científicos se emplean en contra de la humanidad? Da ejemplos.

c. Si fueras dirigente de una potencia mundial, ¿qué políticas tomarías en cuenta para evitar que el desarrollo de la ciencia jugara en contra del bienestar de todas las personas que habitan el planeta Tierra, en especial las relacionadas con fuerzas nucleares como los aceleradores de partículas o los reactores nucleares?



Verifica conceptos

1 **Según la teoría de la relatividad, para dos cuerpos que tienen movimiento uniforme uno con respecto al otro, ¿cómo se podría determinar cuál está realmente en reposo?**

a. Haciendo que un cuerpo deje de moverse.

b. Observando el cuerpo se puede ver si está en reposo o en movimiento.

c. Para dos cuerpos en movimiento no es posible discriminar cuál se mueve y cuál no.

d. Midiendo sus posiciones respecto a sistemas de referencia inerciales diferentes.

2 **Responde. ¿Qué implicaciones tendría el hecho de que se pudiera viajar a una velocidad igual a la de la luz?**

a. El tiempo se haría más corto.

b. La masa de dicho cuerpo aumentaría de manera extraordinaria.

c. La energía del cuerpo disminuiría.

d. La velocidad iría disminuyendo poco a poco.

3 **Teniendo en cuenta la paradoja de los gemelos supón que uno de los gemelos pudiera viajar a un planeta *X* a la velocidad de la luz y volviera a la Tierra, lo más probable que sucedería es:**

a. El gemelo que viajó regresaría anciano.

b. Nada, ya que el tiempo es igual para todos.

c. Por la dilatación del tiempo, el gemelo que se quedó en la Tierra sería más viejo que el otro.

d. Ninguna de las anteriores.

4 **Escribe V, si la afirmación es verdadera o F, si es falsa. Justifica tu respuesta.**

☐ La percepción del espacio-tiempo depende del estado de movimiento del observador, pero relacionada con las mismas ecuaciones físicas.

☐ Según la teoría de la relatividad, la velocidad de la luz en el vacío sería independiente de la velocidad del observador y la velocidad de la fuente que la genera.

Analiza y resuelve

5 **Responde. ¿Qué implicaciones tiene la expresión formulada por Einstein que relaciona la masa con la energía $E = mc^2$?**

6 **Nuestra experiencia nos dice que cuando un cuerpo se ve sometido a la acción de una fuerza durante un tiempo, su energía cinética aumenta, ya que aumenta su velocidad. Supongamos que la fuerza actúa durante un tiempo indefinido, ¿podemos decir que su energía cinética aumenta de la misma manera?**

7 **Responde. ¿Cuáles son los problemas científicos que dieron lugar a la aparición de la teoría de la relatividad?**

8 **Imagina que un tren viaja sin vibración y a velocidad constante por una vía recta. Supón que las ventanillas están cerradas y no pueden ver hacia el exterior. ¿Hay algún experimento que pueda poner de manifiesto el movimiento del tren? ¿Qué dice el primer postulado de la relatividad al respecto?**

Problemas básicos

9 **Un cosmonauta que viaja en una nave espacial mide la longitud de su nave a lo largo del eje *x* en 200 m. ¿Qué longitud tiene la nave con respecto a un habitante de la Tierra que observa pasar la nave con una rapidez de 0,6 c en la dirección del eje *x*?**

10 **En la paradoja de los gemelos, el planeta *X* al cual fue Pablo se encuentra a un distancia d igual a 16 años-luz y su nave alcanza una rapidez de 0,8 c.**

a. Calcula el tiempo que demoraría la nave en llegar al planeta *X* y regresar a la Tierra, medido por Pedro, su gemelo en la Tierra.

b. Calcula el tiempo de ida y vuelta del viaje de Pablo usando la ecuación relativista de la dilatación del tiempo.

11 **Responde. ¿Cuál será la longitud de onda asociada a un cuerpo de 50 kg de masa que se mueve a una velocidad de 72 km/h?**

Actividades

12 **Considera a dos hermanos gemelos. A los 25 años uno permanece en la Tierra y otro es enviado al espacio en una nave que viaja a una velocidad de 0,7 c. Al transcurrir 50 años en la Tierra, el gemelo regresa del viaje. Calcula la edad que tiene cada uno.**

13 **José tiene 20 años y decide partir en un viaje a una estrella situada a 18 años luz de la Tierra. La nave que llevará a José de ida y vuelta a la estrella puede alcanzar una rapidez de crucero de 0,6 c.**

a. ¿Cuánto tiempo, en años, habrá transcurrido desde la partida hasta el regreso a la Tierra medido por José?

b. ¿Qué longitud tiene el recorrido total del viaje con respecto a José?

14 **Cierta nave tiene una rapidez de 0,8 c. Después de viajar por el universo regresa al planeta de donde partió y observa en su reloj que su viaje total ha durado 30 días. ¿Cuánto tiempo duró el viaje de la nave con respecto a un observador en reposo en el planeta, que tenía inicialmente sincronizado su reloj con dicha nave?**

15 **Una nave espacial con una longitud de 250 m medida en reposo, pasa cerca de la Tierra a una velocidad de 0,7 c. ¿Cuál es la longitud de la nave medida por un observador que viaja dentro de ella?**

16 **La energía que el Sol irradia en forma continua hasta el espacio sideral también se puede analizar mediante la ecuación $E = mc^2$. Es más, los científicos creen que esta energía solar tiene su origen en reacciones nucleares de cuatro átomos de hidrógeno que se unen para formar por fusión un átomo de helio. Si el Sol irradia $3{,}9 \cdot 10^{26}$ J de energía por segundo, ¿cuánto disminuye la masa del Sol en un año?**

17 **Un electrón viaja a 99,9% de la velocidad de la luz. ¿Cuál es su masa si se sabe que la masa en reposo es $9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg?**

18 **La masa del electrón en reposo es $9{,}1 \cdot 10^{-27}$ kg. Si el electrón viaja en un tubo de rayos catódicos a una velocidad de $5 \cdot 10^7$ kg, calcula:**

a. La masa del electrón con respecto al tubo de rayos catódicos.

b. La energía total del electrón.



Problemas de profundización

19 **Supón que una persona se aleja de la Tierra en una nave espacial a una velocidad de 0,75 c. Desde la Tierra se dirige un rayo de luz hacia la nave. ¿Cuál será la velocidad de la luz en relación con la nave?**

20 **Un mesón que viaja a una velocidad de 0,95 c tiene una vida propia de 0,02 μs. Para el sistema de un observador en la Tierra, ¿qué distancia recorre el mesón?**

21 **Un muón se produce en la parte alta de la atmósfera a una distancia de 30.000 m sobre la superficie de la Tierra, medida desde un sistema de referencia ubicado en el planeta. Con respecto a la Tierra, la partícula se mueve con velocidad de 0,95 c. ¿Qué distancia recorre el muón durante el tiempo de vida medio con respecto a su propio sistema de referencia?**

22 **Calcula qué hora marcaría un reloj en la Tierra al regresar una nave espacial si esta sale de la Tierra a las 12:00 con v = 0,9 c y vuelve a la Tierra cuando el reloj de la nave marca las 13:00.**

23 **En un experimento llevado a cabo en un acelerador de partículas se hacen chocar dos haces de electrones que avanzan a la misma velocidad. Como resultado de la colisión se genera un par electrón-positrón (el positrón es una partícula con la misma masa que el electrón, pero con carga opuesta, e^+). Calcula:**

a. La mínima energía relativista que debe tener cada electrón para que se produzca ese hecho.

b. La masa relativista de cada electrón.

c. La energía cinética de cada electrón.

d. La velocidad del electrón.

24 **Se determina por métodos ópticos, la longitud de una nave espacial que pasa por las proximidades de la Tierra, resultando ser de 100 m. En contacto radiofónico, los astronautas que viajan en la nave comunican que la longitud de su nave es de 120 m, ¿a qué velocidad viaja con respecto a la Tierra?**

25 **Un electrón tiene una energía en reposo de 0,51 MeV. Si el electrón se mueve con una velocidad de 0,8 c, se pide determinar su masa relativista, su cantidad de movimiento y su energía total.**



Verifica conceptos

1 **Responde. ¿Cuáles son los elementos que separan la luz en los espectrógrafos?**

2 **Explica cómo es posible que el único electrón del átomo de hidrógeno pueda producir luz de tantas frecuencias diferentes.**

3 **Responde. ¿Por qué la visión determinista de la física newtoniana fue modificada radicalmente por la física cuántica?**

a. Porque las leyes de Newton están referidas a leyes de mecánica que se cumplen en sistemas de referencia inerciales, mientras que Einstein se refiere a todas las leyes de la física, incluido el comportamiento de la luz.

b. Porque Newton hablaba de un espacio y tiempo absolutos como algo independiente.

c. Porque Einstein es más realista al plantear que todo lo que nos rodea es relativo, no absoluto.

d. Porque Newton estudiaba sistemas de referencias inerciales; en cambio, Einstein estudiaba todos los sistemas, menos ese.

4 **Calcula la longitud de onda, en angstroms, asociada a un electrón cuya velocidad es de 0,05 c.**

a. 0,49 Å　　c. 0,56 Å

b. 0,2 Å　　d. 0,998 Å

5 **Escribe V, si la afirmación es verdadera o F, si es falsa.**

☐ Un espectrómetro de emisión corresponde a un conjunto de luces que emite un elemento.

☐ Por Planck se sabe que las radiaciones electromagnéticas se emiten a través de cuantos.

☐ Gracias a Planck se sabe que las radiaciones electromagnéticas se emiten en cuantos.

6 **Responde. ¿Qué significan las líneas en un espectro según Bohr?**

7 **Elabora un ejemplo con el que expliques el principio de incertidumbre.**

8 **Responde. ¿En qué se diferencia la descripción del átomo de hidrógeno con la del modelo de Bohr?**

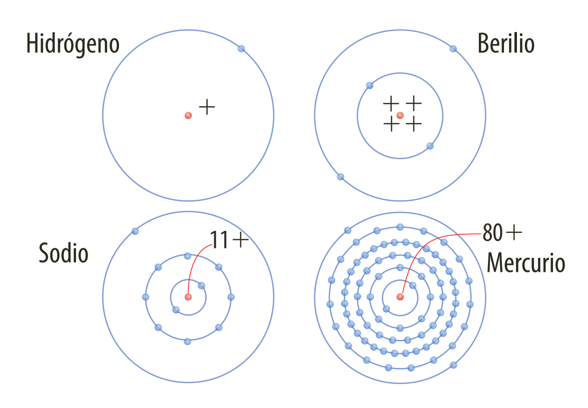
9 **Grafica y señala las zonas en las cuales es más probable encontrar electrones en un átomo.**



Analiza y resuelve

10 **Explica por qué el principio de incertidumbre permite comprender mejor las maravillas del universo.**

11 **Según el modelo de Bohr, ¿cuál es la fuerza que mantiene ligado al electrón en el átomo de hidrógeno? ¿Por qué creen que el tamaño del átomo que poseen cientos de electrones es apenas mayor que el átomo de hidrógeno? (Sugerencia: piensa en las cargas del núcleo y la fuerza eléctrica.)**



12 **A temperatura ambiente, las moléculas de hidrógeno gaseoso tienen una energía cinética media de $6 \cdot 10^{-21}$ J. Una forma de entregar energía a una molécula o átomo es mediante choques, como ocurre cuando hay un aumento de temperatura, la energía cinética de las partículas también aumenta, y así el número de choques entre ellas son mayores. Se sabe que para que un electrón sea arrancado del átomo de hidrógeno necesita una energía de $2,7 \cdot 10^{-18}$ J.**

a. Explica por qué el gas no emite electrones a temperatura ambiente.

b. ¿A qué corresponde el valor de $2,7 \times 10^{-18}$ J en el modelo de Bohr?



Problemas básicos

13 **Un foco incandescente de 50 W emite el 1% de la potencia que se le suministra en forma de luz con frecuencia de $5,45 \cdot 10^{14}$ Hz. Calcula:**

a. La energía de cada fotón.

b. El número de fotones que emite la fuente por segundo.

Actividades

14 **Responde. ¿Cuál es la longitud de onda asociada a una persona de 60 kg que corre con una velocidad de 5 m/s?**

15 **Determina la energía del fotón para las ondas de radio con frecuencia de 1.500 kHz.**

16 **Una estación de radio tiene una frecuencia de 1.200 kHz. Halla la energía de fotones.**

17 **Halla el número de fotones emitidos por segundo si la potencia de la emisora es 6 kW.**

18 **Un foco de 100 W emite el 1% de su potencia suministrándola en forma de luz de frecuencia $6 \cdot 10^{14}$ Hz. Calcula:**

a. La energía de cada fotón.

b. El número de fotones que emite la fuente por segundo.

19 **Una radiación de luz ultravioleta de 3.500 Å de longitud de onda incide sobre una superficie de potasio. Si el trabajo de extracción de un electrón de potasio es de 2 eV, calcula:**

a. La energía por fotón de la radiación incidente.

b. La energía máxima de los electrones extraídos.

20 **Halla el número de fotones por segundo que emite una fuente de luz roja de 60 W, si la longitud de onda emitida es de 6.000 Å.**

21 **Un foco de 50 W emite el 1% de su potencia suministrándola en forma de luz de frecuencia $7 \cdot 10^{14}$ Hz. Calcula:**

a. La energía de cada fotón.

b. El número de fotones que emite la fuente por segundo.

22 **Responde. ¿Cuál es la menor incertidumbre que se puede obtener en la posición de un electrón con una incertidumbre de $9{,}1 \cdot 10^{-23}$ kg m/s?**

23 **Un foco incandescente de 60 W emite en forma de luz de color verde el 0,5% de la potencia que se le suministra. ¿Cuál es la energía de cada fotón de luz de ese color?**

24 **Se tiene una fuente de luz de 100 W que emite en forma de luz de frecuencia $5{,}45 \cdot 10^{14}$ Hz el 1% de la potencia que se le suministra. ¿Cuál es el número de fotones que emite la fuente por segundo?**



Problemas de profundización

25 **La energía mínima necesaria para arrancar un electrón de una lámina de plata de $7{,}52 \cdot 10^{-19}$ J. Determina:**

a. ¿Cuál es la frecuencia umbral y su longitud de onda correspondiente?

b. Si se incide con una luz de longitud de onda de 1.000 Å, ¿qué energía cinética, en eV, tendrán los electrones extraídos?

c. ¿Qué velocidad tendrán estos electrones?

26 **Si el trabajo de extracción de la superficie de un determinado material es de $E_0 = 2{,}07$ eV:**

a. ¿En qué rango de longitudes de onda del espectro visible puede utilizarse este material de células fotoeléctricas? Las longitudes de onda de la luz visible están comprendidas entre 380 nm y 775 nm.

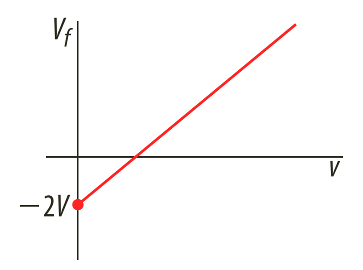
b. Calcula la velocidad de extracción de los electrones emitidos para una longitud de onda de 400 nm.

27 **Un láser de helio-neón de 3 mW de potencia emite luz monocromática de longitud de onda $\lambda = 632{,}8$ nm. Si se hace incidir un haz de este láser sobre la superficie de una placa metálica cuya energía de extracción es 1,8 eV:**

a. Calcula el número de fotones que incide sobre el metal transcurridos 3 s.

b. Calcula la velocidad de los fotoelectrones extraídos y el potencial que debe adquirir la placa para que cese la emisión de electrones.

28 **La gráfica de la figura representa el potencial de frenado V_f de una célula fotoeléctrica en función de la frecuencia ν de luz incidente. La ordenada en el origen tiene valor −2 V. Deduce la expresión teórica de V_f en función de ν.**





Verifica conceptos

1. **Compara en un cuadro los rayos alfa, beta y gamma.**

2. **Menciona las características que tiene un elemento considerado radiactivo.**

3. **Responde. ¿Qué tipo de radiaciones se emplean en la medicina?**

4. **Escribe V, si la afirmación es verdadera o F, si es falsa. Justifica tu respuesta.**

- ☐ La radiactividad natural fue descubierta por Rontgen.
- ☐ El núcleo, en 1932, se creía que estaba formado por dos tipos de partículas, los protones y los neutrones.
- ☐ El modelo nuclear de partícula uniforme fue planteado por Rutherford.
- ☐ La fisión nuclear es un proceso en el cual se logra dividir un núcleo en dos al vencer las fuerzas nucleares.
- ☐ Un reactor nuclear es un dispositivo que se utiliza para desprender electrones de un átomo.
- ☐ La fusión nuclear consiste en unir dos núcleos livianos para convertirlos en otro más pesado.



Analiza y resuelve

5. **El 26 de abril de 1986 tuvo lugar una catástrofe sin precedentes en la historia de la industrialización en la central nuclear de Chernóbil, en Ucrania, sufrió un grave accidente que provocó la liberación de toneladas de material altamente radiactivo a la atmósfera. ¿Cómo podrías explicar que después de más de 20 años del desastre todavía exista radiación de la que se liberó esa noche?**





Problemas básicos

6. **Si se sabe que el oxígeno-16 tiene 8 protones en su núcleo y su masa atómica es 15,9949 u, calcula:**

   a. Su defecto de masa.

   b. La energía de enlace en julios.

   c. La energía de enlace por un nucleón, también en julios.

7. **Para diferenciar los diferentes isótopos de un elemento químico se suele utilizar una nomenclatura en la cual se sitúa a la izquierda del símbolo del elemento un subíndice, que indica el número atómico del elemento, y un superíndice, que indica su número másico. Por ejemplo, en la expresión $^{35}_{17}Cl$, el nombre del isótopo es cloro-35, su número atómico es 17 y su numero másico 35. De acuerdo con esta información, indica el nombre del isótopo, el número atómico y el número másico de:**

   a. $^{11}_{23}Na$ c. $^{30}_{15}P$ e. $^{9}_{4}B$ g. $^{12}_{6}C$

   b. $^{40}_{20}Ca$ d. $^{31}_{17}Z$ f. $^{31}_{16}X$ h. $^{217}_{85}At$



Problemas de profundización

8. **Una muestra contiene inicialmente 10^{20} átomos, de los cuales un 20% corresponden a material radiactivo con un período de semidesintegración de 13 años. Calcula:**

   a. La constante de desintegración del material radiactivo.

   b. El número de átomos radiactivos iniciales y la actividad inicial de la muestra.

   c. El número de átomos radiactivos al cabo de 50 años.

   d. La actividad de la muestra al cabo de 50 años.

9. **Considera la reacción nuclear:**

$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{133}_{51}Sb + ^{99}_{41}Nb + 4\,^{1}_{0}n$$

   a. Explica de qué tipo de reacción se trata y determina la energía liberada por el átomo de uranio.

   b. Responde. ¿Qué cantidad de $^{235}_{92}U$ se necesita para producir 106 kW-h?

Decaimiento radiactivo

La radiactividad es un fenómeno físico por el cual algunos cuerpos o elementos emiten radiaciones que pueden ser restringidas en placas fotográficas, ionizar gases o producir fluorescencia. Existen tres formas diferentes de decaimiento radiactivo, alfa (α), beta (β) y gamma (γ) que dependen de las partículas radiactivas emitidas por cada elemento. En esta práctica de laboratorio se desea simular el comportamiento del decaimiento radiactivo de una muestra.

Conocimientos previos

Modelo atómico y radiactividad.

Materiales

- Un número entero de dados, mínimo 50
- Cubeta para lanzar los dados

Procedimiento

1. Lanza todos los dados sobre la cubeta, de tal manera que queden sobre una de sus caras.
2. Selecciona todos los dados que hayan caído en el número 6 y sácalos de la cubeta; escribe en la tabla de registro la cantidad de dados que cayeron en este número.



Tabla de registro

Lanzamientos	Número de dados
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	



3. Lanza nuevamente los dados restantes y repite el proceso anterior hasta que queden por lo menos dos dados.
4. Si decimos que cada dado representa un átomo y los dados que cayeron en 6 representan los átomos que han decaído radiactivamente, podemos hacer una gráfica del número de dados que caen en 6 en función del número de lanzamientos. Construye esta gráfica.

Análisis de resultados

1. A partir de la gráfica, describe cuál es el comportamiento de decaimiento radiactivo de una muestra.
2. Si el número de lanzamientos representa al tiempo de días, ¿cuál puede ser la vida media de la muestra radiactiva?
3. Explica qué implicaciones puede tener:
   a. Si la muestra radiactiva es muy grande. Explica tu respuesta.
   b. Si la vida de la muestra radiactiva es, por ejemplo, de 1.000 años. Explica tu respuesta.

Radiación

La experiencia nos indica que cuando se aumenta la temperatura de un objeto, este emite radiación térmica, la cual puede variar dependiendo de la temperatura que experimente el objeto. Así inicialmente es difícil de percibir un cambio en el objeto pero al aumentar su temperatura, este cambia a un color rojizo y finalmente a blanco dependiendo de las propiedades del material. Un estudio sobre la radiación muestra que está distribuida en longitudes de onda que incluyen una parte infrarroja, visible y ultravioleta. En esta práctica de laboratorio se desea analizar el poder emisor de radiación producida por cuerpos de diferente color.

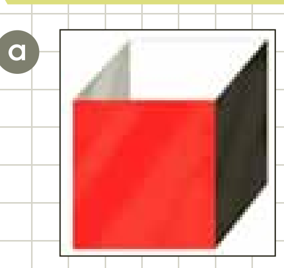
Conocimientos previos

Radiación y temperatura.

Materiales

- Recipiente metálico en forma cúbica
- 4 termómetros
- 4 soportes con varilla
- 4 nueces dobles
- Mechero
- 4 pinzas
- Malla

a



b



Procedimiento

1. Toma el recipiente metálico y pinta tres caras (tanto su interior como exterior), una de blanco, otra de negro, la otra de rojo, y la última déjala sin pintar, es decir, plateada (figura a).
2. Ubica un termómetro a 3 cm de cada cara del recipiente (figura b).
3. Vierte agua caliente dentro del recipiente y observa la lectura de cada termómetro en un intervalo de tiempo. Escribe los resultados en la tabla de registro 1.

Tabla de registro 1

Superficie	Temperatura
Blanco	
Negro	
Rojo	
Plateado	

4. Desaloja el agua contenida en el recipiente y seca este completamente.
5. Pon el mechero en el interior del recipiente, enciéndelo y observa el cambio de la lectura de cada termómetro. Escribe tus observaciones en la tabla de registro 2.

Tabla de registro 2

Superficie	Temperatura
Blanco	
Negro	
Rojo	
Plateado	

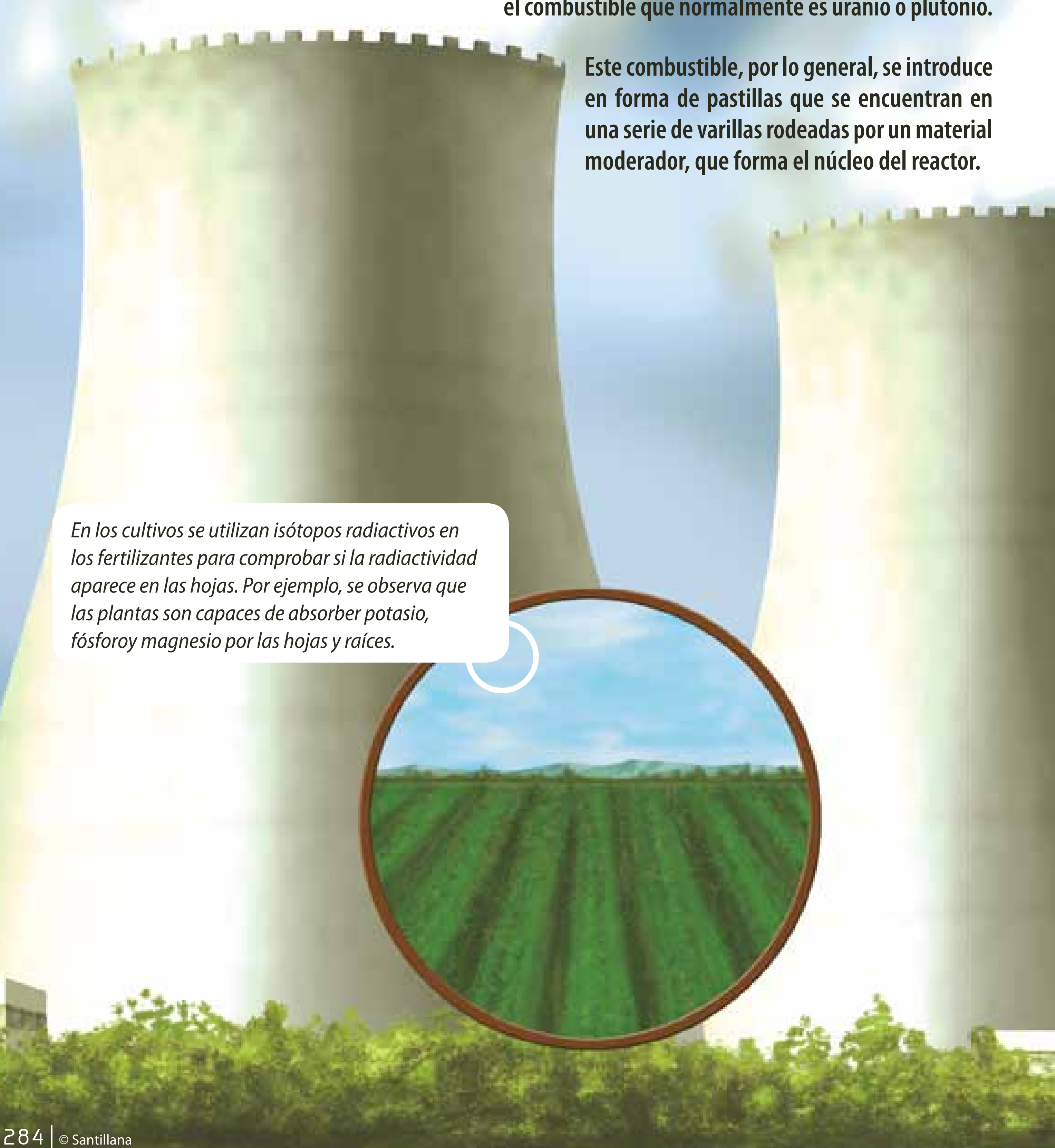
Análisis de resultados

1. A partir de los resultados obtenidos, ¿cuál superficie emite mayor radiación y cuál menor?
2. ¿La superficie que emite radiación es la que más absorbe calor? Explica tu respuesta.
3. ¿Cuál es la razón por la cual los trajes que usan los bomberos son de color amarillo?

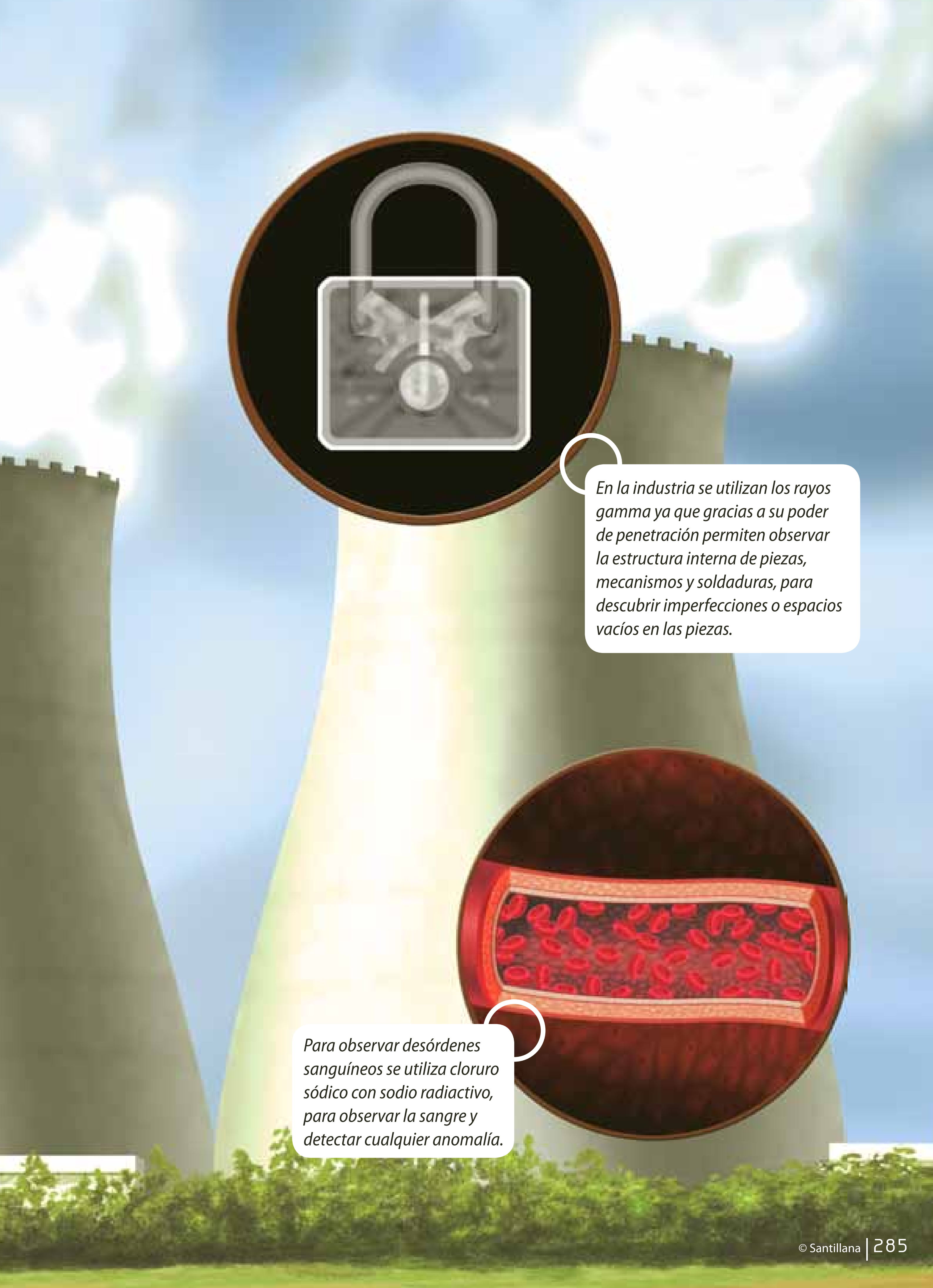
REACTORES NUCLEARES

Para controlar la energía que se desprende en las reacciones de fisión en cadena, se necesita un sistema que impida que el número de fisiones supere ciertos límites. Este sistema se llama reactor nuclear y consiste básicamente en una vasija en cuyo interior se encuentra el combustible que normalmente es uranio o plutonio.

Este combustible, por lo general, se introduce en forma de pastillas que se encuentran en una serie de varillas rodeadas por un material moderador, que forma el núcleo del reactor.



En los cultivos se utilizan isótopos radiactivos en los fertilizantes para comprobar si la radiactividad aparece en las hojas. Por ejemplo, se observa que las plantas son capaces de absorber potasio, fósforoy magnesio por las hojas y raíces.


En la industria se utilizan los rayos gamma ya que gracias a su poder de penetración permiten observar la estructura interna de piezas, mecanismos y soldaduras, para descubrir imperfecciones o espacios vacíos en las piezas.
Para observar desórdenes sanguíneos se utiliza cloruro sódico con sodio radiactivo, para observar la sangre y detectar cualquier anomalía.


GLOSARIO



Aislante: material que no es buen conductor de la electricidad, llamado también dieléctrico.
Amplitud: máxima distancia que un cuerpo con movimiento oscilatorio alcanza con respecto a la posición de equilibrio.
Amplitud de onda: altura de una cresta o profundidad de un valle con respecto a la posición de equilibrio de las partículas del medio.
Ángulo de incidencia: ángulo formado por la normal y el rayo incidente.
Ángulo de reflexión: ángulo formado por la normal y el rayo reflejado.
Ángulo de refracción: ángulo formado por la normal y el rayo refractado.



Bobina: conductor largo enrollado en forma de espiral, cuyas espiras se disponen una a continuación de la otra.



Campo eléctrico: campo de fuerza en una región del espacio en la cual las cargas eléctricas experimentan fuerza eléctrica. En un punto su valor es igual al de la fuerza que experimenta una carga eléctrica de valor unitario.
Campo magnético: campo de fuerza en una región en la cual se detecta fuerza magnética.
Capacidad eléctrica: medida de la cantidad de carga que puede almacenar un condensador por cada voltio de diferencia de potencial al que se someta. Su unidad en el Sistema Internacional de Unidades es el faradio.
Carga eléctrica: propiedad fundamental de la materia a la cual se atribuyen fuerzas de atracción y repulsión.
Centro de una lente: punto ubicado en el punto medio de los dos focos de la lente.
Conductor: material que permite que la carga fluya dentro de él y se distribuya libremente en su interior.
Corriente alterna: corriente eléctrica que cambia de dirección en intervalos regulares de tiempo.
Corriente directa: flujo de carga y de la perturbación en una sola dirección dentro de un conductor.



Difracción de ondas: fenómeno que experimentan las ondas cuando bordean obstáculos.
Diodo: elemento construido con materiales semiconductores que permite el paso de corriente en una dirección y lo bloquea cuando se invierte la diferencia de potencial aplicada entre sus extremos.
Dioptría: unidad definida para lentes igual al inverso de la distancia focal. 1 dioptría $= 1\ m^{-1}$.
Dispersión de la luz: separación de la luz en colores debido al aumento del índice de refracción de las sustancias cuando la longitud de onda disminuye.



Efecto Doppler: fenómeno de las ondas debido al movimiento de la fuente emisora con respecto al observador receptor que consiste en que la frecuencia del sonido percibido es diferente a la frecuencia del sonido emitido.
Efecto fotoeléctrico: emisión de electrones por un metal cuando sobre él incide un rayo luminoso de determinada frecuencia.
Electroimán: imán construido con una bobina cuyo campo es generado por la corriente eléctrica que circula a través de ella.
Elongación: posición con respecto a la posición de equilibrio de un objeto que describe un movimiento oscilatorio.
Energía potencial elástica: energía asociada a un sistema elástico.
Energía potencial eléctrica: energía potencial asociada a una carga eléctrica debido a su posición en un campo eléctrico.
Espectro de absorción: líneas oscuras que aparecen en el espectro electromagnético las cuales dependen de la sustancia a través de la cual pasa la radiación.
Espectro visible de emisión: conjunto de líneas brillantes características de cada elemento cuando se excita por medio de calor o por una descarga eléctrica.
Estado excitado: estado de un átomo que no se encuentra en su estado fundamental de energía.
Estado fundamental: estado de más baja energía en un sistema cuántico.



Fotometría: estudio de la medición de la luz en la región visible.
Fotón: unidad discreta de energía luminosa (cuanto de luz).
Frecuencia: número de vibraciones u oscilaciones producidas por unidad de tiempo.
Frente de onda: línea que une todos los puntos vecinos de una onda que vibran en fase.
Fuentes coherentes: fuentes que producen ondas de la misma frecuencia con diferencia de fase constante.
Fuerza de restitución: fuerza dirigida hacia la posición de equilibrio (0) que actúa sobre un objeto que describe un movimiento oscilatorio.
Fuerza electromotriz: energía por unidad de carga eléctrica suministrada por una fuente.
Función de onda: función que permite describir la forma de una onda en cualquier instante.



Hipermetropía: defecto de refracción en el que la imagen de los objetos se forma detrás de la retina. Se corrige con lentes convergentes.



Imagen real: imagen producida por un espejo o por un conjunto de lentes que se puede proyectar en una pantalla.
Imagen virtual: imagen no real producida por un espejo o un conjunto de lentes.
Inducción electromagnética: producción de fuerza electromotriz en un circuito debido a un campo magnético variable.
Interferencia constructiva: interferencia de ondas cuando en un punto se encuentran dos crestas o dos valles.
Interferencia de ondas: fenómeno que ocurre cuando dos o más ondas de la misma naturaleza se encuentran, en determinado instante, en un punto del espacio.



Líneas de campo magnético: líneas que representan la dirección del campo magnético en una región.
Líneas de fuerza eléctrica: líneas que representan el campo eléctrico en una región del espacio.
Longitud de onda: distancia entre dos puntos consecutivos del medio de propagación de una onda que vibran en fase.
Lumen: unidad de medida del flujo luminoso. Equivalente a 1/680 W de luz amarilla-verde (l = 550 nm).



Malla de un circuito: camino cerrado formado por los conductores dentro de un circuito.
Medio de propagación: medio a través del cual se propagan las ondas.
Miopía: defecto de refracción en el que la imagen de un objeto lejano se forma adelante de la retina. Se corrige con lentes divergentes.
Movimiento armónico simple: movimiento oscilatorio en el cual se desprecia la fricción y el valor de la fuerza de restitución es directamente proporcional a la elongación.
Movimiento oscilatorio: movimiento periódico que ocurre cuando un cuerpo ocupa sucesivamente posiciones simétricas con respecto a una posición denominada posición de equilibrio.



Nodo: punto del medio de propagación de una onda estacionaria para el cual, en todo instante, el desplazamiento es nulo.
Normal: línea recta imaginaria perpendicular a una superficie en el punto de incidencia de un rayo.
Nudo de un circuito: punto de un circuito en donde coinciden tres o más conductores.



Onda armónica: onda que al propagarse, hace que las partículas del medio describan movimiento armónico simple.
Onda electromagnética: onda que transporta energía por medio de campos eléctricos y campos magnéticos.
Onda estacionaria: onda producida cuando se superponen dos ondas de las mismas características y que se propagan en igual dirección y sentidos opuestos.
Onda longitudinal: onda que al propagarse ocasiona que las partículas del medio material oscilen en la misma dirección del movimiento ondulatorio.



Onda mecánica: onda que transporta energía a través de un medio material elástico.
Onda polarizada: onda transversal cuyas vibraciones se producen en un solo plano.
Onda transversal: onda que al propagarse ocasiona que las partículas del medio oscilen en dirección perpendicular a la dirección del movimiento ondulatorio.
Óptica geométrica: estudio de la luz por medio del modelo de rayos.
Oscilaciones amortiguadas: oscilaciones producidas en los sistemas reales en los que siempre hay fricción y, en consecuencia, se disipa energía.
Oscilaciones forzadas: oscilaciones producidas sobre un objeto cuando se somete a una fuerza externa.
Oscilador armónico: cuerpo que describe un movimiento armónico simple.



Período: tiempo empleado en realizar una oscilación o se produce una vibración.
Potencial eléctrico: energía potencial eléctrica por unidad de carga. Se mide en voltios.
Pulsaciones: efecto de interferencia producido por dos sonidos cuyas frecuencias son ligeramente diferentes.



Rayos alfa (α): flujo de partículas, cada una de ellas con dos protones y dos neutrones. Son poco penetrantes.
Rayos beta (β): flujo de electrones. Radiación más penetrante que los rayos alfa.
Rayos gamma (γ): radiaciones electromagnéticas altamente energéticas cuyas longitudes de onda están comprendidas entre 10^{-10} m y 10^{-13} m. Radiación muy penetrante.
Red de difracción: dispositivo construido con bastantes rendijas muy delgadas que permite separar los colores de la luz por interferencia.
Reflexión (de las ondas): cambio de dirección que experimenta una onda cuando choca contra un obstáculo.
Reflexión total: reflexión de la luz cuando incide en la superficie de separación con un ángulo de incidencia mayor que el ángulo límite.
Refracción de ondas: cambio de dirección que experimentan las ondas cuando pasan de un medio de propagación a otro.
Resistencia: oposición que presenta un conductor al flujo de corriente. Se mide en ohmios.



Semiconductor: sustancia que con respeto al movimiento de cargas, presentan una oposición intermedia entre los aislantes y los conductores. Estas sustancias son la base de los diodos y los transistores.
Superficie equipotencial: superficies en un campo eléctrico sobre las cuales todos los puntos están al mismo potencial.



Transformador: dispositivo que permite aumentar o reducir el voltaje mediante inducción electromagnética.

BIBLIOGRAFÍA

- ARISTEGUI A., ROSANA; BAREDES, CARLA; FRENÁNDEZ, DIEGO; SILVA, ADRIÁN; SOBICO, CECILIA. *Física II.* BUENOS AIRES, Santillana, 2000.
- CARRASCOSA, JAIME; MARTÍNEZ, SALVADOR. *Problemas de Física COU.* Madrid, Santillana, 1997.
- CARRON, WILSON; GUIMARAES, OSVALDO. *As faces da Física.* Moderna, 2000.
- CROMER, ALAN. *Física para las ciencias de la vida y de la salud*. Barcelona, Reverté, 1982.
- CID, FÉLIX ANTONIO. *Física 1*. República Dominicana, Santillana, 2001.
- CURTIS, HELENA Y BARNES, N. SUE. *Biología.* Buenos Aires, Editorial Médica Panamericana, 1993.
- *Física*. Lima, Santillana Innova, 2008.
- *Física.* Madrid, Santillana educación, 2009.
- GIANCOLI, DOUGLAS C. *Física. Principios con aplicaciones.* México, Prentice-Hall Iberoamericana S.A., 1994.
- HETCH, EUGENE. *Física en perspectiva*. México, Addison Wesley Iberoamericana, 1987.
- HETCH, EUGENE. *Física*, *Álgebra y Trigonometría.* México, Thomson, 1998.
- HEWITT, PAUL G. *Física conceptual.* México, Pearson, 1999.
- HEWITT, PAUL Y ROBINSON, PAUL. *Manual de laboratorio de Física*. México, Pearson, 1998.
- KANE, JOSEPH W. Y STERNHEIM, MORTON M. *Física,* Barcelona, Reverté, 1991.
- KRAMER, CRAIG. *Prácticas de Física*. México, Mc Graw-Hill, 1993.
- SEARS, FRANCIS W.; ZEMANSKY, MARK W.; YOUNG, HUSH D. *Física Universitaria.* México, Addison Wesley, 1998.
- SERWAY, RAYMOND A. *Física.* México, McGraw-Hill Interamericana de México, 1993.
- TIPLER, PAUL A. *Física*. Barcelona, Reverté, 1992.
- WILSON, JERRY D. *Física con aplicaciones,* México, Mc Graw Hill, 1994.

Fuentes de Internet

webplaza.pt.lu

www.en.wikipedia.org

www.physlink.com

physicsweb.org.jobs

www.es.encarta.msn.com

www.galeon.com

www.astromia.com

www.sc.ehu.es/sbweb/fisica

